

# 粉煤灰-矿渣超细复合粉对混凝土耐久性的影响

倪坤<sup>1</sup>, 廖述聪<sup>2</sup>, 王梦宇<sup>2</sup>, 代佳龙<sup>1</sup>, 王鑫<sup>2</sup>, 王雪蕊<sup>2</sup>

(1. 北京建工新型建材有限责任公司, 100015, 北京; 2. 建筑材料工业技术情报研究所, 100015, 北京)

**摘要:** 为了减少混凝土生产中的水泥用量、降低混凝土碳排放, 提升混凝土性能, 研究了粉煤灰-矿渣超细复合粉作为掺合料对混凝土抗渗透、抗碳化、抗冻、干缩等耐久性能的影响, 并简要分析了其影响机理。结果表明: 粉煤灰-矿渣超细复合粉能够提升混凝土的抗压强度; 掺粉煤灰-矿渣超细复合粉的混凝土抗冻性能、抗氯离子渗透性能、抗碳化性能等耐久性能均有一定程度提升; 掺粉煤灰-矿渣超细复合粉后混凝土干缩率降低。

**关键词:** 粉煤灰; 矿渣粉; 超细掺合料; 耐久性

**中图分类号:** TU 5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-4726(2023)19-2324-04

## INFLUENCE OF ULTRAFINE COMPOSITE POWDER OF FLY ASH AND SLAG ON CONCRETE DURABILITY

NI Kun<sup>1</sup>, LIAO Shu-cong<sup>2</sup>, WANG Meng-yu<sup>2</sup>, DAI Jia-long<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, WANG Xue-rui<sup>2</sup>

(1. BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., 100015, Beijing, China; 2. Institute of Technical Information for Building Materials Industry, 100015, Beijing, China)

**Abstract:** In order to reduce the cement amount and carbon emission in concrete production, and improve the concrete performance, the influence of ultrafine composite powder of fly ash and slag as admixture on the concrete durability (e.g. permeability resistance, carbonization resistance, frost resistance and dry shrinkage) was studied, and the influence mechanism was briefly analyzed. Results showed: ultrafine composite powder of fly ash and slag can improve the compressive strength of concrete. The frost resistance, chloride penetration resistance, carbonization resistance and other durability properties of concrete with superfine composite powder of fly ash and slag have been improved to some extent. The dry shrinkage of concrete decreased after ultrafine composite powder of fly ash and slag was added.

**Keywords:** fly ash; slag powder; ultrafine admixture; durability

如今粉煤灰、矿渣粉等混凝土掺合料的使用已经相当普遍, 二者复合使用, 可以表现出很好的表面微晶化效应、诱导激活效应和界面耦合效应。粉煤灰矿渣二者发挥各自的优势实现互补, 有利于提高混凝土性能。将粉煤灰和矿粉复合后进行超细化处理制得超细复合掺合料, 可以显著发挥粉煤灰和矿粉复合后的超叠加效应, 赋予混凝土良好的力学性能、耐久性能及干缩性能。

通过试验测试了混凝土抗压强度、抗碳化、抗渗性、干缩等混凝土力学性能和长期性能, 分析了粉煤灰-矿渣超细复合掺合料对不同配比混凝土性能的影响, 掌握其在普通混凝土和高性能混凝土中的应用性能特点和最佳用量, 以推广此类超细复合掺合料产品在混凝土搅拌站中的规模化应用, 实现减碳、节能、增效的目的。

收稿日期: 2023-06-20

作者简介: 倪坤 (1982—), 男, 山西运城人, 高级工程师, 博士, e-mail: nikunun@126.com.

## 1 原材料及试验

### 1.1 原材料

试验中使用的超细复合粉为唐山某公司生产的粉煤灰-矿渣超细复合粉, 具体性能见表 1。

表 1 超细复合粉性能指标

检测项目	比表面积/ (m <sup>2</sup> /kg)	30 μm 筛余 /%	粒度分析		活性指数	
			D50	D90	7d	28d
测试结果	692	0	8.10	21.45	80	93

水泥选用唐山生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥, 性能指标见表 2。

表 2 水泥性能指标

检测项目	标准稠度 /%	凝结时间 /min		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		初凝	终凝	3d	7d	3d	7d
测试结果	25.8	212	268	5.1	8.5	25.6	53.2

矿粉为 S95 级矿粉, 流动度比 102%, 28d 活性

指数 100%, 比表面积  $430\text{ m}^2/\text{kg}$ ; 粉煤灰为 F 类 II 级粉煤灰, 细度为 11.2%, 需水量比 99%。

细骨料主要为 II 级中砂和部分铁尾矿砂, 粗骨料为洗净的 5~20 mm 连续级配碎石, 外加剂为高性能聚羧酸减水剂。

## 1.2 试验方法

试验通过调整超细粉掺量进行了一系列试配, 以测试混凝土性能的变化。其中, 混凝土抗压强度试验参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》规定的试验方法, 混凝土耐久性相关试验参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定的试验方法。

## 1.3 试验配合比

运用等质量取代法分别将粉煤灰-矿渣超细复合粉代替不同水胶比的基准配合比 (C30 混凝土 A0、C50 混凝土 B0) 的全部矿粉后, 再逐级增加掺量替代水泥, 探讨不同超细粉掺量对普通混凝土和高强混凝土的影响。C30 混凝土水胶比 0.44、砂率 43%, 配合比见表 3。

表 3 C30 混凝土配合比

编号	水泥	矿粉	粉煤灰	复合粉	砂	石	水	减水剂
A0	220	54	86	0	788	1044	160	7.2
A1	220	0	86	54	788	1044	160	7.2
A2	198	0	86	76	788	1044	160	7.2
A3	176	0	86	98	788	1044	160	7.2
A4	154	0	86	120	788	1044	160	7.2
A5	132	0	86	142	788	1044	160	7.2
A6	110	0	86	164	788	1044	160	7.2

高强混凝土的强度等级为 C50, 水胶比为 0.33, 砂率为 39%, 配合比见表 4。

表 4 C50 混凝土配合比

编号	水泥	矿粉	粉煤灰	复合粉	砂	石	水	减水剂
B0	332	68	88	0	676	1056	160	10.2
B1	332	0	88	68	676	1056	160	10.7
B2	300	0	88	101	676	1056	160	11.2
B3	267	0	88	134	676	1056	160	11.2
B4	234	0	88	167	676	1056	160	11.7
B5	201	0	88	200	676	1056	160	11.7

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 对混凝土抗压强度的影响

根据表 3、表 4 的配合比成型混凝土试件, 进行

抗压强度测试, 各龄期试验结果如图 1 所示。

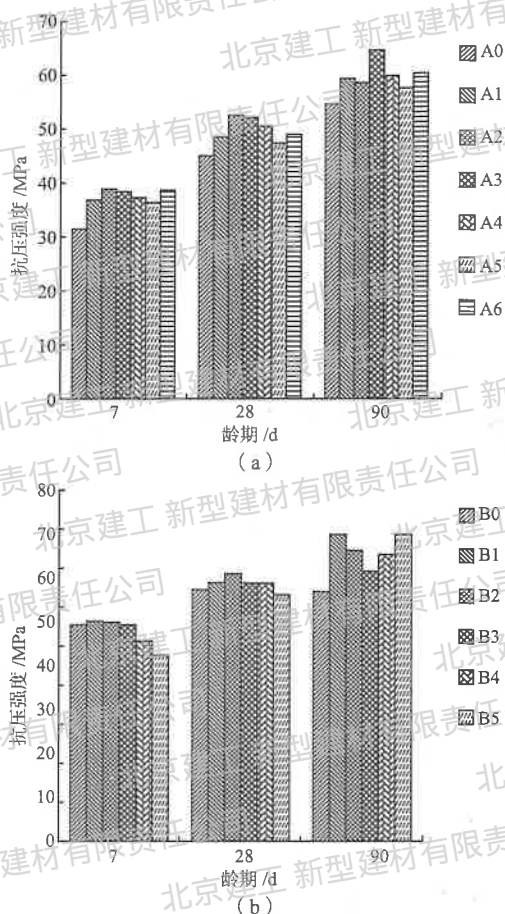


图 1 不同掺量超细粉对混凝土强度的影响  
(a) 抗压强度; (b) 抗折强度

水胶比在 0.44 时不同超细粉掺量对混凝土抗压强度影响如图 1 (a) 所示。可以看出, 使用粉煤灰-矿渣超细复合掺合料代替矿粉和部分水泥后, 各龄期强度均有一定程度的提高, 其中 A2 组在 7d、28d 提升最高, A3 组在 90d 强度提升最高。

观察水胶比为 0.33 的高强混凝土的试验结果可以得出, 粉煤灰-矿渣超细复合粉替代矿粉和水泥后, 随着掺量的增加 B1~B5 组 7d 强度逐渐降低, 而且 B4、B5 与 B0 组相比强度有较大下降。主要是因为矿物掺合料在掺量较少的情况下, 掺合料超细颗粒的微集料效应改善混凝土孔结构, 但随着掺量进一步增加, 超细粉与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 反应才能生成具有胶凝性的水化产物, 总体反应速率低于水泥水化速率, 在超细粉等量替代水泥后, 会使胶凝体系的水化速率变慢, 早期强度降低。

### 2.2 对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响

耐久性试验是检验超细掺合料在混凝土中应用的必要指标, 试验选择具有代表性的 A1、A3 及 B1、B3 作为试验组, 将 A0、B0 作为基准组进行对比分析,

分别测试了不同配比下,粉煤灰-矿渣超细复合粉对混凝土抗氯离子侵蚀性能、抗冻性能、抗渗性能、碳化性能等方面的影响。

抗氯盐侵蚀性能是混凝土耐久性的一项重要指标,一般抗氯盐侵蚀性能好的混凝土耐久性也较好。在我国北方地区,由于冬季需撒盐除冰,通常会给混凝土结构带来严重的耐久性问题。例如,北京西直门立交桥建成不足20年就因氯离子侵蚀,造成钢筋锈蚀拆除重建。测定56d养护龄期的混凝土电通量,测试结果见表5。

表5 56d养护龄期的混凝土电通量测试结果

编号	电通量 /C
A0	1196
A1	764
A3	699
B0	956
B1	944
B3	811

由试验结果可以看出,无论是普通混凝土还是高强混凝土,随着超细粉取代量的上升,氯离子电通量都会逐渐降低,这代表混凝土抗氯离子渗透性能的提升。这说明混凝土整体密实度。矿物掺合料进行的二次水化反应和水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成水化硅酸钙凝胶,改善了界面属性。另外有许多研究得出,矿物掺合料随着龄期发展,能够改善混凝土孔结构,减少有害大孔,增加微孔数量,从而提升混凝土抗渗性。超细复合掺合料的活性比普通掺合料更高,可以生成更多水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝反应产物,这些胶凝物质混凝土内部孔隙起到填充作用,而且超细掺合料颗粒粒径更小,填充效应较普通掺合料更加明显。

### 2.3 对混凝土抗冻性能的影响

混凝土的抗冻性能是耐久性的重要指标,混凝土内部的孔隙结构直接决定了其抗冻性能的强弱。一般情况下,混凝土内部的毛细孔中存在未参与水化反应的自由水,当混凝土处于低于 $0^\circ\text{C}$ 的环境时,其内部自由水受冷结冰,体积发生膨胀,产生膨胀力,破坏其内部孔隙结构,引发混凝土破坏。运用快冻法每进行50次冻融循环后测定混凝土试件的质量,以此评价混凝土抗冻性能。

混凝土质量损失率如图2所示。由图2可知,在冻融循环100次前,质量损失率呈现下降趋势,可能

是因为试件内部孔隙仍在发育,水分更容易进入,导致试件质量增加。冻融循环300次时,配合比编号A1的混凝土质量损失率最低,未掺超细粉的混凝土质量损失率最高,表明加入适量粉煤灰-矿渣超细复合粉可以在一定程度上提高混凝土的抗冻性。掺有超细粉的混凝土直到冻融循环300次时质量损失率均低于1%,也表明混凝土在低温环境下可长期稳定使用。

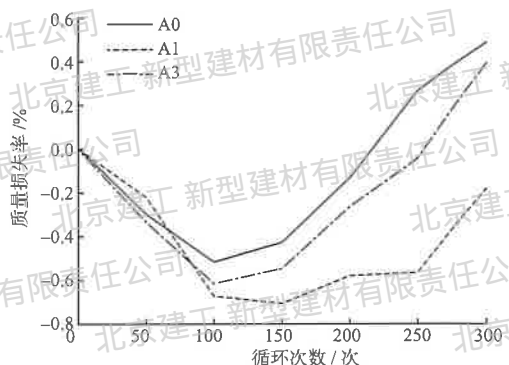


图2 混凝土冻融循环次数与质量损失率

### 2.4 对混凝土碳化深度的影响

采用快速碳化法测试混凝土碳化深度。混凝土的碳化是指混凝土所受化学腐蚀,当空气中的 $\text{CO}_2$ 进入混凝土内部与碱性物质发生的化学反应生成碳酸盐和水后,导致混凝土的内部碱性环境被破坏,增加了钢筋锈蚀风险,试验结果如图3所示。

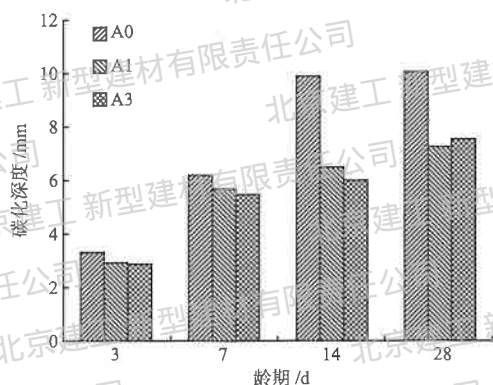


图3 混凝土碳化深度

由图3试验结果可以看出,3组混凝土碳化深度均随着龄期变化而增加。其中3d、7d龄期时,随着超细粉掺入,碳化深度略微降低,3d时A1、A3分别降低了0.41mm和0.55mm,7d时A1、A3分别降低了0.53mm和0.72mm;在14d、28d时,掺入超细粉的混凝土碳化深度相比对照组明显降低,14d时A1、A3分别降低了3.36mm和3.86mm,28d时A1、A3分别降低了2.72mm和2.46mm。总体来看,

A1与A3两组配比抗碳化能力基本相当,这说明超细复合掺合料对提升混凝土抗碳化能力有利,其对混凝土微观结构具有改善作用,使混凝土孔隙率减小,密实度提高,使空气中的 $\text{CO}_2$ 不易进入混凝土内部与混凝土中的碱性物质反应,宏观表现为混凝土抗碳化能力提升。

### 2.5 对混凝土干缩的影响

混凝土干缩变形是一种常见的混凝土变形现象,能够引起混凝土开裂,导致结构耐久性能降低。影响混凝土收缩的原因很多,除了温度、湿度等外界因素,就混凝土材料本身,就有水泥组分和用量、水灰比、用水量、集料品种与含量、掺合料品种与数量,以及外加剂等因素。采用常用的混凝土无约束收缩试验的方法,在其他条件基本不变的情况下,选择A0、A1、A3这3组配合比,探讨超细粉对C30混凝土干燥收缩性能的影响。3组混凝土收缩率如图4所示。

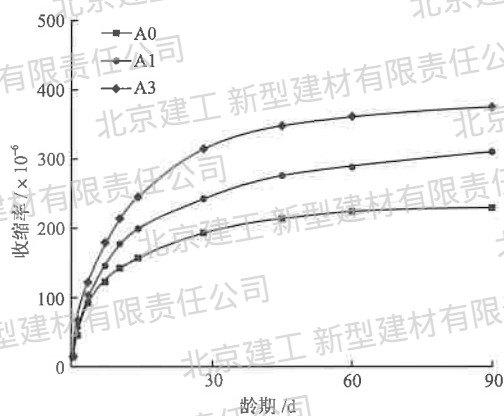


图4 混凝土干缩率

从图4可以看出,3组混凝土收缩率发展趋势一致,均为0~14d收缩率快速增长,此后增速放缓,60d后变化不大。超细掺合料替代全部矿粉和20%水泥时收缩最小,仅替代矿粉的A1组,其收缩率也有一定程度的改善。这表明,加入适量超细掺合料能够降低混凝土的早期收缩,其原因是超细掺合料的微集料效应可以使混凝土的内部微观结构更密实,增强混凝土抵抗收缩变形的能力,而超细复合粉的粒径越小、掺量越大,生成的火山灰反应产物越多,填充作用越强,混凝土内部结构就越密实,使干燥收缩率降低越明显。此外,超细粉颗粒的弹性模量比水泥颗粒、水泥水化物颗粒的弹性模量大,可以在水泥石结构中起到支撑作用,也限制了混凝土收缩变形的发生。同时,由于超细粉参与水化反应的程度远低于水泥,在掺入超细粉后,造成体系中的自由水含量增加,从而使混凝土干缩减少。

## 3 结论

(1) 粉煤灰-矿渣超细复合粉掺入可提高普通混凝土及高强混凝土强度,且90d强度不倒缩。其中,普通混凝土中超细粉在替代45%总胶凝材料的情况下,各龄期强度均超过基准组。高强混凝土中超细粉替代总胶材30%时,会影响早期强度发展,但随着其中矿粉、粉煤灰的二次水化,后期强度有明显改善。

(2) 粉煤灰-矿渣超细复合粉的掺入可改善混凝土耐久性,其中对混凝土抗氯离子侵蚀性能、碳化性能、抗冻性能均有有利影响。随着超细粉掺量的增加,混凝土抗氯离子渗透性能提升。仅掺入超细粉替代矿粉时,混凝土抗冻性能最佳。超细粉能够降低混凝土的碳化深度,尤其在14d龄期后超细粉对混凝土碳化深度降低作用明显。不同超细粉掺量对混凝土干缩影响结果存在差异,超细粉在普通混凝土中替代全部矿粉和20%水泥时收缩率降低。

### 参考文献

- [1] 刘音,刘洋,周煜明,等.机械研磨时间对粗粉煤灰基充填胶凝材料性能的影响[J].煤炭科学技术,2017,45(6):5.
- [2] 姚占全,刘紫玫,吴晗晗,等.双掺陶瓷抛光粉-矿粉对混凝土抗冻性的影响[J].排灌机械工程学报,2022,40(2):150-156.
- [3] 李琼,冯琼,曹辉.再生骨料级配混凝土力学性能的影响及微观机理分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(5):614-620.
- [4] 黄志斌,袁芬,李光玉,等.复掺超细掺合料的高性能混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].粉煤灰,2014,26(1):1-5.
- [5] 王巍,李英泉,韩桂英,等.固硫灰渣混凝土超细掺合料应用技术研究[J].陕西建筑,2019(10):44-49.
- [6] 夏威.掺矿粉粉煤灰混凝土塑性收缩的量化研究[J].新型建筑材料,2006(10):1-6.
- [7] 周万良,方坤河,詹炳根.掺粉煤灰、矿粉混凝土抗碳化性能研究[J].混凝土与水泥制品,2012(12):14-19.
- [8] 丁小华,杨雨清,朱晓寒,等.基于粉煤灰-矿渣地聚合物的露天矿筑路材料疲劳性能研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(4):809-817.
- [9] 冯雪,闫姝,黄凯,等.粉煤灰-矿渣基无机聚合物颗粒吸附剂的制备及其吸附性能[J].材料与冶金学报,2023,22(2):152-157.
- [10] 陈文秀,范丽楠,安赛,等.电石渣掺量对粉煤灰-矿渣复合材料的凝结时间与抗压强度影响[J].河北科技师范学院学报,2022,36(4):72-77.
- [11] 王海荣,朱志铎,浦少云,等.碱激发粉煤灰-矿渣固化镉污染土的影响因素分析[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(6):1025-1032.
- [12] 徐昆,刘宇,杨雨清,等.基于粉煤灰-矿渣地聚合物的露天矿山运输道路筑路工艺研究[J].煤炭工程,2021,53(S1):13-17.
- [13] 赵兆龙.基于粉煤灰-矿渣地聚合物的露天矿山运输道路筑路工艺研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
- [14] 贺馨瑶,田雨泽.粉煤灰-矿渣地聚合物泡沫混凝土的性能研究[J].辽宁科技大学学报,2021,44(2):158-160.
- [15] 陈冀渝.黏土-粉煤灰-矿渣高强免烧砖的研制[J].砖瓦,2021(4):14-15.