

# 粉煤灰陶粒制备轻质高强混凝土的试验研究

毛雨琴<sup>1</sup>, 王小雨<sup>1</sup>, 朱路平<sup>1</sup>, 崔晏<sup>2</sup>

(1. 上海第二工业大学 环境与材料工程学院, 上海 201209;

2. 攀枝花学院 材料工程学院, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:**以粉煤灰和页岩陶粒为基本原料制备轻质高强混凝土 (High-strength light weight concrete, HSLC), 考察了水灰比、轻集料等对试块性能的影响。结果表明, 在轻集料强度一定的条件下, HSLC 的抗压强度会随水灰比的增加而提高; 在一定的水灰比下, 轻集料的强度对 HSLC 的强度起决定性作用。此外, 原材料中适当添加减轻剂漂珠可以降低混凝土试块的表观密度; 所用不同品种的水泥也会对混凝土试块的抗压强度产生一定的影响。

**关键词:**粉煤灰; 配合比设计; 抗压强度; 轻质高强混凝土

中图分类号: X733

文献标志码: A

## Experimental Study on Preparation of High-Strength Light Weight Concrete with Fly Ash and Ceramsite

MAO Yuqin<sup>1</sup>, WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, ZHU Luping<sup>1</sup>, CUI Yan<sup>2</sup>,

(1. School of Environmental and Materials Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. School of Materials Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

**Abstract:** Fly ash and shale ceramsite were used as basic raw materials to prepare high-strength light weight concrete (High-strength light weight concrete, HSLC). The effects of water cement ratio and lightweight aggregate on the properties of the HSLC samples were investigated. The results show that the compressive strength of HSLC will increase with the increase of water cement ratio under the condition of constant light aggregate strength, and the strength of light aggregate played a decisive role in the compressive strength of HSLC under a certain water cement ratio. In addition, the apparent density of concrete blocks can be reduced by properly adding floating beads in raw materials. The different types of cement used will also have a certain impact on the compressive strength of concrete samples.

**Keywords:** fly ash; mix proportion design; compressive strength; high-strength light weight concrete

## 0 引言

轻质高强混凝土 (High-strength light weight concrete, HSLC) 具有质轻、高强、耐久性好、无碱骨料反应、体积稳定性好、保温隔热性能良好等优点<sup>[1]</sup>,

可广泛应用于大跨度桥梁、城市立交桥、海工构筑物、高层建筑等工业与民用建筑, 具有很好的经济价值。自上世纪 60 年代以来, HSLC 在世界范围内获得了长足的发展和应用, 目前已成世界混凝土技术的发展方向之一。随着经济快速发展, 世界各国

收稿日期: 2020-10-12

通信作者: 朱路平 (1976-), 男, 湖北咸宁人, 教授, 博士, 主要研究方向为环境友好功能材料。E-mail: lpzhu@sspu.edu.cn

基金项目: 上海电子废弃物资源化协同创新中心开放课题 (B50ZS120003B-10), 上海第二工业大学研究生基金 (EGD18YJ0049, EGD17YJ0005), 上海第二工业大学飞跃计划项目 (EGD18XQD26), 上海自然科学基金资助项目 (18ZR1415700) 资助

对混凝土的需求量越来越大, 我国的混凝土年用量已经达到了 70 亿 t, 占世界的 45% 以上。作为混凝土重要组成部分的水泥, 在生产过程中的能源和环境问题十分突出。因此, 迫切需要发展绿色高性能混凝土以实现社会的可持续发展。近年来, 高性能生态环保型 HSLC 的制备受到了国内外学者的广泛关注。其中, 粉煤灰替代水泥来制备 HSLC 的研究引起了人们的极大重视。

粉煤灰作为燃煤电厂的副产品, 具有量大、价廉的特点。我国每年燃煤电厂排放的粉煤灰约为 1.2 亿 t, 当前处理粉煤灰主要有建立贮灰场储灰和粉煤灰综合利用两种方式, 直接长期堆放粉煤灰不仅占用大量的土地, 还会破坏土壤的酸碱平衡, 影响动、植物的生存空间<sup>[2-4]</sup>。国外已对粉煤灰的综合利用开展了相当多的研究, 其中, 法国对粉煤灰的利用率高达 75%, 德国的利用率为 65%, 而我国的利用率相对较低, 加强粉煤灰的综合利用迫在眉睫<sup>[5-6]</sup>。粉煤灰作为一种工业固废, 将其添加至混凝土中, 不仅可以填充混凝土内部的孔隙, 提高混凝土的抗渗性, 而且还能极大地减少混凝土搅合过程中的用水量、降低混凝土早期的干燥收缩, 提高其抗压强度和耐久性。此外, 粉煤灰对于混凝土的密实性也有很大提升作用。根据国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T1596-2005), 粉煤灰分为多个品级, 我国燃煤电厂产生的粉煤灰大多品级较低, 能够达到 I、II 级别的非常少。为提高其品级, 通常需要进行脱碳、研磨等处理, 这在一定程度上增加了生产成本, 延长了生产周期, 推高了粉煤灰资源综合利用的门槛<sup>[6]</sup>。因此, 将低品质粉煤灰直接添加到混凝土中, 并通过合理的配比设计来制备 HSLC, 不仅可以减少土地占用、降低环境危害, 而且还能减耗增效、节约成本, 达到资源可持续发展的要求, 具有较高的经济和社会效益。

本文以粉煤灰和页岩陶粒为主要的原材料通过合理的配比设计, 制备了 HSLC, 并对其相关性能进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

实验器材: 电子桌秤(最大称量 5 kg, 分度 0.5), 搅拌机(转速 90 r/min), 震动台(频率 2 860 次/min),

HBV-40B 混凝土标准养护箱, FSY-150A 水泥细度负压筛析仪, YAW-300C 型微机控制恒应力水泥压力试验机(最大负荷 2 000 kN), 混凝土模具(100 mm×100 mm×100 mm), 泥抹子, 砖刀, 毛刷等。

主要试剂: 700 级页岩陶粒, 铝酸盐水泥, F 级粉煤灰, PY 一型高效减水剂, 硅灰, 漂珠, 自来水。

### 1.2 试验方案

HSLC 的配合比设计要求与普通混凝土的要求相同, 参照行业标准《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)<sup>[7]</sup> 得到的试验数据, 如表 1 所示。

本试验以 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 的用量进行实验, 具体的配合比数据见表 2。

所得试块在 HBV-40B 混凝土标准养护箱中养护 28 d(温度 (20±3) °C, 湿度大于 90%), 然后测量其抗压强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水灰比对 HSLC 的影响

在一定的荷载作用下, 试件表面首先会发出微小的裂开声, 随着荷载力增加, 立方体试件会出现竖向的裂纹, 然后裂纹逐渐贯穿整个试件, 最后完全破裂。从每组试块中任意选取两块对其进行最大荷载测量。按照行业规定<sup>[7]</sup>, 配制强度可由下式计算:

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (1)$$

式中:  $f_{cu,0}$ -混凝土的配制强度, MPa;  $f_{cu,k}$ -混凝土立方体抗压强度标准值, MPa;  $\sigma$ -混凝土强度标准差,  $\sigma$  的取值可按表 4 取用。1.645-强度保证系数, 其对应强度保证率为 95%。

由于 HSLC 要求混凝土的强度等级不小于 CL30, 因此混凝土强度标准差  $\sigma$  应取 6.0。当混凝土立方体抗压强度标准值为 55 MPa 时, 根据式 (1) HSLC 的配制强度  $f_{cu,0} = f_{cu,k} + 1.645\sigma = 55 + 1.645 \times 6 = 64.87$  MPa, 其平均抗压强度如图 1 所示。从中可以看出, 当水灰比相同, 粗、细骨料的用量不同时, 试块的抗压强度有较大的差别。当细骨料与粗骨料质量之比为 1:1.5 时, 混凝土试块的抗压强度较高, 都达到了 50 MPa 以上, 说明当粗、细骨料达到一定比例之后, 混凝土的抗压强度升高。主要由于粗、细骨料与水泥有较好的相容性, 能较好地减少混凝土试块的孔隙率, 从而增加试块的抗压强度, 即材料的结构越密实, 抗压强度越高。此外, 所

表1 HSLC的配合比设计  
Tab. 1 Mix proportion design of the HSLC

编号	水泥	水	细骨料	粗骨料	粉煤灰	硅灰	单位
1	337.5	108.0	342.3	582.8	67.5	45.0	kg
	1	0.32	1.01	1.73	0.20	0.13	%
2	375.0	120.0	397.8	527.3	75.0	50.0	kg
	1	0.32	1.06	1.41	0.20	0.13	%
3	412.5	132.0	370.0	555.0	82.5	55.0	kg
	1	0.32	0.90	1.35	0.20	0.13	%
4	337.5	121.5	397.8	527.3	67.5	45.0	kg
	1	0.36	1.18	1.56	0.20	0.13	%
5	375.0	135.0	370.0	555.0	75.0	50.0	kg
	1	0.36	0.99	1.48	0.20	0.13	%
6	412.5	148.5	342.3	582.8	82.5	55.0	kg
	1	0.36	0.83	1.41	0.20	0.13	%
7	337.5	135.0	370.0	555.0	67.5	45.0	kg
	1	0.40	1.10	1.64	0.20	0.13	%
8	375.0	150.0	342.3	582.8	75.0	50.0	kg
	1	0.40	0.91	1.55	0.20	0.13	%
9	412.5	165.0	397.8	527.3	82.5	55.0	kg
	1	0.40	0.96	1.28	0.20	0.13	%

表2 HSLC各组分的用量  
Tab. 2 Dosage of each component of the HSLC

编号	水泥/kg	粗骨料(鹅卵石/页岩陶粒)/(kg/kg)	细骨料/kg	粉煤灰/kg	硅微粉/漂珠/(kg/kg)	减水剂/kg
A	1.82	0/1.98	1.32	0.182	0.182/0	0.06
B	1.82	1.98/0	1.32	0.182	0.182/0	0.06
C	1.82	0.66/1.32	1.32	0.182	0.182/0	0.06
D	1.82	1.98/0	1.32	0.182	0.091/0.091	0.06
E	1.82	0.66/1.32	1.32	0.182	0/0.182	0.06
F	1.82	0.66/1.32	1.32	0.182	0.182/0	0.06
G	1.82	0.66/1.32	1.32	0.182	0.091/0.091	0.06
H	1.82	0.66/1.32	1.32	0.182	0.182/0	0.06
I	1.82	0.66/1.32	1.32	0.182	0.091/0.091	0.06

说明: A 为基准组, B、C、D、E、F 和 G 所用水泥为高 Al 水泥 (铝酸盐 CA—50—G9), H 和 I 所用水泥为硅酸盐 42.5R 水泥; F 的粗骨料、细骨料都经过水洗, 而其余组材料未水洗。

表3 混凝土强度标准差  $\sigma$  值

Tab. 3 Strength standard deviation  $\sigma$  value of concrete

混凝土强度等级	低于 C20	C20~C35	高于 C35
$\sigma$ /MPa	4.0	5.0	6.0

等有关。

表4 硅微粉的化学成分

Tab. 4 Chemical composition of the silica powder %

	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O
粉煤灰	65.7	20.63	4.65	2.93	2.25	0.60
硅微粉	93.7	0.30	0.80	0.20	0.20	0.30

有试块的平均抗压强度均未达到配制  $f_{cu,0}$ , 这可能与试块制备过程中的搅拌方式、环境的温度、湿度、试件的形状尺寸、所加荷载的大小及试块表面状态

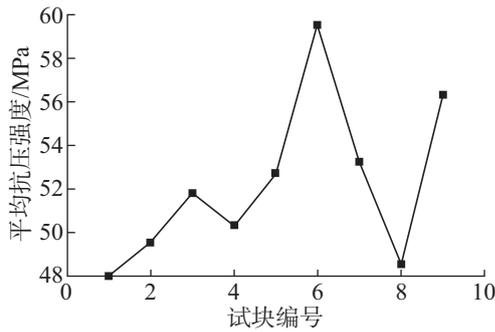


图 1 不同试块的平均抗压强度图

Fig. 1 Average compressive strength of the different test blocks

图 2 所示为不同水灰比 (W/C) 时, 不同试块的平均抗压强度图。从中可以看出, 在同种水泥的条件下, 混凝土试块的抗压强度主要取决于水灰比。通常, 水泥水化时所需的结合水只占水泥质量的 23% 左右, 在拌制混凝土拌和物时, 为了达到所需的流动性, 往往采用较大的水灰比。混凝土硬化后, 试块中多余的水分残留在混凝土内部形成气泡, 或者蒸发后在试块表面形成气孔, 从而在混凝土的内部及表面形成孔隙, 这会降低混凝土抵抗外力的能力。因此, 当满足和易性要求的混凝土的水灰比越大时, 混凝土的抗压强度越高。如果在实验过程中加水太少, 即水灰比过小时, 拌和物则过于干硬, 从而使混凝土中出现较多的孔洞, 抗压强度反而有所降低。

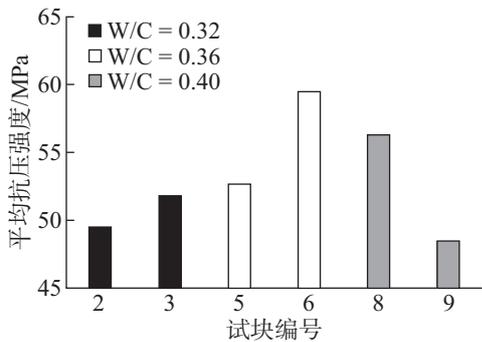


图 2 水灰比不同时试块的平均抗压强度

Fig. 2 Average compressive strength of the test blocks with different water cement ratio

### 2.2 水泥品种对 HSLC 的影响

图 3 所示为水灰比相同时, 不同品种的水泥对混凝土试块抗压强度的影响。其中 A、G 试块使用的是强度等级较高的铝酸盐水泥, 而 H、I 试块使用的是 42.5R 的硅酸盐水泥, A 和 H (或 G 和 I) 试块除了所用水泥的品种不同外, 其余原材料均相同。从图可以看出, 使用铝酸盐水泥的试块抗压强度明显高于硅酸盐水泥的试块。因此, 在配合比相同的前

提条件下, 实验过程所用到的水泥强度等级越高, 所制备出来的混凝土强度越高。

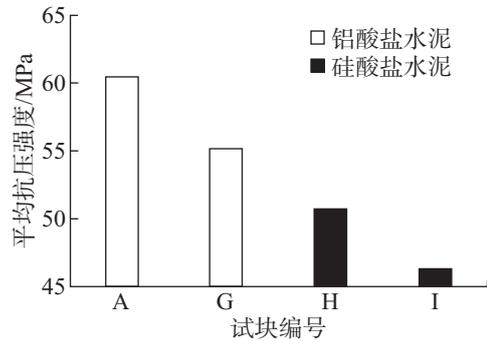


图 3 不同水泥品种下试块的平均抗压强度

Fig. 3 Average compressive strength of the test block with different cement types

### 2.3 硅微粉/漂珠对抗压强度的影响

图 4 所示为相同水灰比的条件下, 不同硅微粉/漂珠下试块的平均抗压强度图。由图可以看出, E 与 C 试块的平均抗压强度值相差很大。E 与 C 试块的最显著区别在于原材料中是否添加了漂珠 (见表 2), 其中 E 试块添加了漂珠, 而 C 试块没有。漂珠作为一种减轻剂, 在配制 HSLC 的过程添加漂珠, 通常有利于减轻混凝土试块的表现密度。然而, 作为一种硅质的空心球体, 漂珠自身的强度通常比较低, 不能经受长时间的摩擦与碰撞, 这就使得只添加漂珠的 HSLC 试块的抗压强度明显低于不添加漂珠的 HSLC 试块。

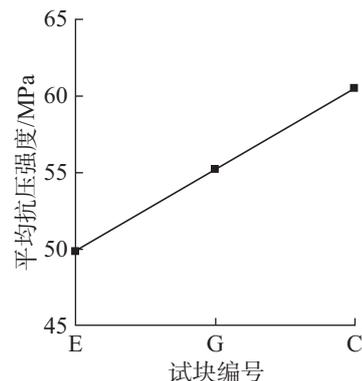


图 4 不同硅微粉/漂珠下试块的平均抗压强度

Fig. 4 Average compressive strength of the test blocks with different silica fume/floaters

对 C、E、G 试块的组成成分进行分析发现, G 试块和 C、E 试块的区别在于是否采用了矿物掺和料的复掺技术, G 试块采用了“硅微粉 + 漂珠”的复掺技术, 其中,  $m(\text{硅微粉})/m(\text{漂珠})=0.091/0.091$ , 而 C 和 E 试块则分别采用的是硅微粉和漂珠的单掺技术。矿物掺和料的化学成分如表 4 所示。

在 HSLC 的配制过程中,矿物掺和料这种工业废料起着不可替代的作用。一方面可以保护环境,另一方面可以改善混凝土的力学性能等。在水灰比相同的情况下,采用复掺技术对于 HSLC 的相关性能极为重要。G 试块硅微粉的掺量为水泥用量的 5%,而 C 试块的掺量为水泥用量的 10%,E 试块没有加入硅微粉。由于硅微粉具有很强的火山灰活性,可以用于配制高强、超高强混凝土,其掺量通常为水泥用量的 5%,而在配制超高强混凝土时,掺量可达 20% 左右。由图 4 可以看出,掺入的硅灰越多,混凝土试块的抗压强度越高。而添加漂珠有利于 HSLC 试块轻质化,但一定程度上会降低试块的抗压强度。因此,需在兼顾高抗压强度的同时,适当轻质化,从而使配制的 HSLC 满足实际应用的要求。目前 HSLC 的研究大都集中于单掺的方法,对于复掺两种或两种以上矿物的研究较少。复掺法在普通混凝土的配制中能够产生很好的“叠加效应”,对于复掺法能否对 HSLC 产生相同的效果,以及在什么范围内达到最佳效果等,值得进行深入的探究。

此外,对于 HSLC 的研究还需从多方面进行考虑,如外加剂量的调节;粉煤灰陶粒混凝土的抗冻性能、抗渗性能;粉煤灰陶粒混凝土的疲劳试验等,从而实现 HSLC 性能的最优化。

### 3 结 论

用粉煤灰和页岩陶粒等为基本原料制备了 HSLC,研究粉煤灰陶粒混凝土的抗压强度。结果表明:

(1) HSLC 的强度主要与混凝土的水灰比以及轻集料的强度有关。在轻集料强度一定的条件下,HSLC 的抗压强度会随水灰比的增加而提高;水灰比在一定时,轻集料的强度对 HSLC 的强度起着决定性的作用。因此,制备 HSLC 的关键在于选择强度等级较高的轻集料。

(2) 在兼顾 HSLC 抗压强度的同时,原材料中可适当添加漂珠以实现混凝土试块的轻质化。

(3) 所用不同品种的水泥也会对混凝土试块抗压强度产生一定的影响。铝酸盐水泥试块的抗压强度明显高于硅酸盐水泥的试块。因此,在配合比相同时,实验过程所用到的水泥强度等级越高,所制备出来的混凝土强度越高。

#### 参考文献:

- [1] SHORT A, KINNIBURGH W. *Lightweight concrete* [M]. 3rd edition. London: Applied Science Publishers Ltd, 1978.
- [2] 吕新锋. 火电厂固体废弃物资源化利用创新探索 [J]. 节能与环保, 2017(12): 62-65.
- [3] 宋頔. 粉煤灰综合利用技术的分析研究 [J]. 中国新技术新产品, 2018(4): 53-54.
- [4] 王彦忠, 朱善淳. 火力发电厂固体废弃物资源化利用分析 [J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(4): 63-65.
- [5] 鲁晓勇, 朱小燕. 粉煤灰综合利用的现状与前景展望 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(2): 295-298.
- [6] 张金山, 李彦鑫, 曹永丹. 粉煤灰的综合利用现状及存在问题浅析 [J]. 矿产综合利用, 2017(5): 22-26.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ55—2011 普通混凝土配合比设计规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.