

文章编号: 1007-6492(2001)04-0081-04

# 承重粉煤灰砖材料配合比及其力学性能的研究

周晓英<sup>1</sup>, 谢丽丽<sup>2</sup>, 刘立新<sup>1</sup>, 王仁义<sup>1</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州大学综合设计研究院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 用湿排粉煤灰、水泥、骨料等材料, 适当加入外加剂和激发剂以激发粉煤灰的活性, 采用模压成型, 自然养护制成双免粉煤灰砖, 测定粉煤灰砖的抗压强度等各项指标. 通过调整粉煤灰砖各材料的掺量, 利用正交设计的方法, 共进行了9组计81个不同配合比的试件和试块的物理和力学性能试验, 通过实验, 找出了各种材料配合比与粉煤灰砖抗压强度的关系, 得到了各项指标均达到或超过目前粘土砖的模压成型、自然养护的粉煤灰砖最佳配比.

**关键词:** 粉煤灰砖; 正交设计; 抗压强度

**中图分类号:** TU 502+.6 **文献标识码:** A

## 0 引言

目前, 砌体结构仍是我国房屋建筑的主要结构形式之一. 据统计, 全国以砌体材料为主要建筑材料并用以建造的各类房屋仍占80%~90%. 我国目前用于砌体结构的砖主要有烧结普通砖、烧结多孔砖、蒸压灰砂砖、蒸压粉煤灰砖等4种. 其中, 烧结普通砖、烧结多孔砖是以粘土为主要原料经焙烧制成, 目前占我国砖产量的85%以上. 经计算, 生产每万块砖需取土毁田4.7~6.7 m<sup>2</sup>, 全国每年生产上千亿块粘土砖, 毁坏农田6666.7公顷, 使我国人口多、耕地少的矛盾更显突出. 为了保护耕地, 实现可持续发展的战略, 国务院在1999年发出的《关于进一步加强土地管理, 切实保护耕地的通知》中再次强调, 要发展新型墙体材料, 以取代粘土砖. 有关部委和各省、市、自治区也陆续制定了限制或禁止使用粘土砖的政策<sup>[1]</sup>.

蒸压灰砂砖是以石灰和砂为主要原料, 经压制成型蒸压养护而成的实心砖. 蒸压粉煤灰砖是以粉煤灰和石灰为主要原料, 掺加适量石膏和集料, 经压制成型蒸压养护而成的实心砖. 这两种砖都是粘土砖的替代产品, 但由于须采用高压蒸气养护, 生产过程耗能较多, 砖的价格较高, 影响了推广使用, 目前产量较少, 尚不能完全取代粘土砖.

养护粉煤灰砖是近年来我国一些地区正在研制中的一种新型砖, 是以粉煤灰为主要原料, 适当加入水泥及部分集料, 并加入外加剂激发粉煤灰的活性, 采用模压成型, 并在自然养护条件下硬化而成的一种承重砌体材料. 由于采用自然养护, 大大降低了生产成本, 其价格低于粘土砖或与粘土砖持平, 是极有发展前途的粘土砖的替代产品.

我国电力构成以煤电为主, 约占80%左右. 随着电力工业的飞速发展, 粉煤灰排量急剧增加, 2000年已达16亿吨, 而热电行业由于大多采用湿式除尘装置, 所产生的粉煤灰灰质差, 给综合利用造成困难, 平均利用率不到40%. 每排放2000吨灰渣将占地666.7 m<sup>2</sup>[2]. 因此利用粉煤灰生产品质优良且价格可与粘土砖竞争的自然养护承重粉煤灰砖来代替粘土砖, 可减少毁田烧砖节约耕地, 又可减少粉煤灰造成的环境污染, 变废为宝, 社会效益和经济效益都十分显著.

本研究以湿排粉煤灰为主要原料, 利用普通硅酸盐水泥作为粘合剂和激发剂, 并掺入高效减水剂、添加剂等复合外加剂, 通过调整各种材料的掺量, 利用正交设计的方法, 研制出抗压强度、吸水率等各项指标均能达到要求的阻燃养护承重粉煤灰砖.

## 1 原材料组成

(1) 粉煤灰: 采用郑州市上街铝厂湿排原状

收稿日期: 2001-09-10; 修订日期: 2001-10-20

基金项目: 2001年郑州市城建科技开发项目(郑建科字[2001]07号)

作者简介: 周晓英(1976-), 女, 河南省邓州市人, 郑州大学硕士研究生.

粉煤灰,其化学成分和部分物理性能见表1.

(3)骨料 粒径为3~5 mm的碎石.

(2)水泥 采用425#普通硅酸盐水泥,其物理性能如表2所示.

(4)外加剂:主要由高效减水剂、早强剂、激发剂等有机和无机材料复合而成.

表1 粉煤灰化学成分和部分物理性能

Table 1 The chemical ingredient and partial physical performance of fly ash

| 项目  | $u(\text{SiO}_2)$ | $u(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ | $u(\text{Al}_2\text{O}_3)$ | $u(\text{CaO})$ | $u(\text{MgO})$ | $u(\text{SO}_2)$ | 烧失量   | 细度   | 需水率比 |
|-----|-------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------|------|------|
| 检测值 | 48.53             | 5.74                       | 21.70                      | 5.02            | 2.13            | 0.32             | 12.68 | 50.2 | 116  |

表2 水泥部分物理性能

Table 2 Partial physical performance of cement

| 0.08 mm 筛余量/% | 需水量比/% | 安定性 | 凝结时间/min |     | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      |
|---------------|--------|-----|----------|-----|----------|------|----------|------|
|               |        |     | 初凝       | 终凝  | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 6.2           | 27.5   | 合格  | 110      | 350 | 24.6     | 48.5 | 4.5      | 7.2  |

## 2 试验方案及方法

### 2.1 试件的制作及养护

本研究由于在加压的过程中产生的侧压力过大,普通的混凝土试模不能承受,所以采用自己加工的100 mm×100 mm×120 mm的钢试模,受机械模具的控制,振捣模压成型,在加压的过程中控制其最大压应力为25 MPa.成型后可立即拆模,在常温常压下养护,逐步达到设计强度,同时满足各指标的要求.

验筛选出使粉煤灰砖的强度、耐久性达到或超过目前的粘土砖的性能,从而达到取代粘土砖的目的.各因素水平如表3所示.

表3 正交设计因素水平(4因素3水平)

Table 3 Factor and level of orthogonal design (four factor, three level)

| 水平 | 粉煤灰/% | 水泥/% | 水用量/% | 外加剂 |
|----|-------|------|-------|-----|
| 1  | 75    | 10   | 0.18  | 1#  |
| 2  | 70    | 12   | 0.2   | 2#  |
| 3  | 65    | 14   | 0.22  | 3#  |

### 2.2 正交试验设计及结果<sup>[3,4]</sup>

采用粉煤灰、水泥、外加剂等利用正交设计试

正交表采用 $L_9(3^4)$ 试验方案(骨料掺量为非独立因素)其试验结果如表4所示.

表4  $L_9(3^4)$ 试验方案与试验结果

Table 4 Scheme and result of the experimentation

| 试验号      | 粉煤灰/% | 水泥/%  | 水/%   | 外加剂   | 骨料/% | 抗压强度/MPa | 吸水率/% | 体积质量/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|----------|-------|---------------------------|
| 1        | 75    | 10    | 0.22  | 3#    | 15   | 12.08    | 21.25 | 1550                      |
| 2        | 70    | 10    | 0.20  | 1#    | 20   | 12.15    | 19.43 | 1663                      |
| 3        | 65    | 10    | 0.24  | 2#    | 25   | 11.0     | 21.08 | 1649                      |
| 4        | 75    | 12    | 0.20  | 2#    | 13   | 12.72    | 19.62 | 1628                      |
| 5        | 70    | 12    | 0.24  | 3#    | 18   | 13.83    | 20.14 | 1630                      |
| 6        | 65    | 12    | 0.22  | 1#    | 23   | 15.32    | 21.38 | 1687                      |
| 7        | 75    | 14    | 0.24  | 1#    | 11   | 15.47    | 22.99 | 1666                      |
| 8        | 70    | 14    | 0.22  | 2#    | 16   | 16.50    | 21.72 | 1664                      |
| 9        | 65    | 14    | 0.20  | 3#    | 21   | 17.82    | 19.17 | 1680                      |
| $M_{1j}$ | 241.6 | 211.6 | 256.1 | 257.6 | -    | -        | -     | -                         |
| $M_{2j}$ | 254.9 | 251.2 | 263.4 | 241.5 | -    | -        | -     | -                         |
| $M_{3j}$ | 265.0 | 298.7 | 242.0 | 262.4 | -    | -        | -     | -                         |
| $m_{1j}$ | 13.42 | 11.75 | 14.23 | 14.31 | -    | -        | -     | -                         |
| $m_{2j}$ | 14.16 | 13.96 | 14.63 | 13.41 | -    | -        | -     | -                         |
| $m_{3j}$ | 14.72 | 16.59 | 3.44  | 14.58 | -    | -        | -     | -                         |
| $R_j$    | 1.3   | 4.84  | 1.19  | 1.17  | -    | -        | -     | -                         |
| $S_j$    | 15.2  | 211.5 | 13.3  | 13.4  | -    | -        | -     | -                         |

说明 ① $M_{ij}$ ,  $m_{ij}$ 分别为第*i*水平、*j*因子所有试验结果的总和及平均值; $R_j$ 为*j*因子对指标的影响大小; $S_j$ 为*j*因子对指标影响的显著性.②每种水平/因素的试件为6个,取平均值为其试验结果.③表中的抗压强度、吸水率、体积质量均为28 d测定值.④表中只分析了抗压强度的方差.5.水的掺量为水泥和粉煤灰之和的百分比.

(1)由表可知,抗压强度较高而吸水率较低的配合比为9号试验(外掺材料组合为

$A_3B_3C_1D_3$  (A 为粉煤灰, B 为水泥, C 为水, D 为外加剂) 其抗压强度值为 17.82 MPa, 超过目前粉煤灰砖的最高强度等级 MU 15 (抗压强度为 15 MPa), 同时也超过了烧结普通砖 MU 15 的强度等级 (抗压强度为 15 MPa), 另外 6, 7, 8 号试验均超过了粉煤灰砖和烧结普通砖的 MU 15 的强度等级, 其他试验结果抗压强度也达到了 MU 10 的要求。

(2) 从表 4 的抗压强度的方差分析可知, 水泥对粉煤灰砖强度的提高效果很显著, 呈线性关系, 见如图 1 所示。外加剂、水和粉煤灰的影响不是很显著, 并且离散性也比较大。随粉煤灰掺量的增加, 抗压强度降低, 粉煤灰和抗压强度的关系, 如图 2 所示。水和抗压强度的关系, 如图 3 所示, 外加剂和抗压强度的关系, 如图 4 所示。综合考虑, 较好的因素水平组合为  $A_3B_3C_2D_3$  (表中无此组合) 即粉煤灰 65%, 水泥 14%, 水 0.22%, 3 # 外加剂。考虑到 1 # 外加剂、3 # 外加剂及 1 #、3 # 水掺量对粉煤灰砖强度提高的影响相差不大, 理论上暂时确定为可供选择的最优试验条件为:  $A_3B_3C_2D_1$  (粉煤灰 65%, 水泥 14%, 水 0.22%, 1 # 外加剂),  $A_3B_3C_1D_3$  (与 9 号试验相吻合, 粉煤灰 65%, 水泥 14%, 水 0.2%, 3 # 外加剂),  $A_3B_3C_1D_1$  (粉煤灰 65%, 水泥 14%, 水 0.2%, 1 # 外加剂)。最终取什么条件, 还可通过进一步的对比试验由生产实际确定。

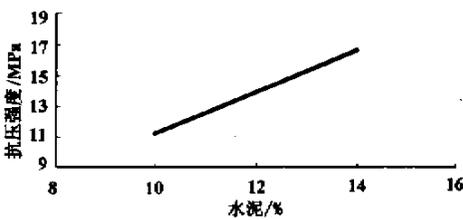


图 1 水泥和抗压强度的关系

Fig. 1 The correlation between cement and compressive strength

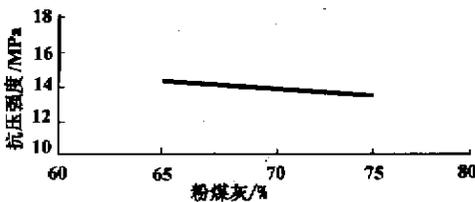


图 2 粉煤灰和抗压强度的关系

Fig. 2 The correlation between fly ash and compressive strength  
万方数据

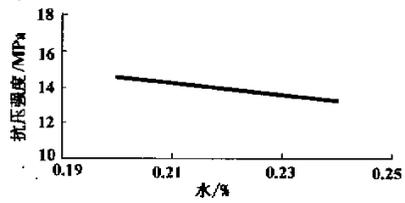


图 3 水和抗压强度的关系

Fig. 3 The correlation between water and compressive strength

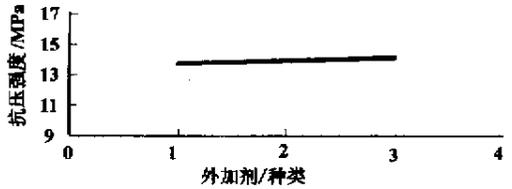


图 4 外加剂和抗压强度的关系

Fig. 4 The correlation between admixture and compressive strength

### 2.3 配合比的确定

为了确定最佳配合比, 表 5 给出了一部分试验的变异系数和标准值等的试验值。表 6 给出了粘土砖和粉煤灰砖的抗压强度的标准。

表 5 抗压强度试验值

Table 5 The experimental value of compressive strength

| 试验编号 | 最小值/MPa | 平均值/MPa | 标准差/MPa | 变异系数  | 标准值/MPa |
|------|---------|---------|---------|-------|---------|
| 4    | 12.5    | 12.72   | 0.392   | 0.031 | 12.01   |
| 5    | 13      | 13.85   | 0.761   | 0.055 | 12.46   |
| 6    | 14.8    | 15.53   | 0.662   | 0.043 | 14.13   |
| 9    | 16.5    | 17.82   | 0.783   | 0.044 | 16.41   |

表 6 粘土砖和粉煤灰砖的抗压强度

Table 6 The compressive strength of the clay

|       |     | 烧结普通砖 |       | 粉煤灰砖 |       |
|-------|-----|-------|-------|------|-------|
| 强度等级  | 平均值 | 标准值   | 强度等级  | 平均值  | 单块值   |
| MU 15 | 15  | 10    | MU 15 | 15   | ≥ 10  |
| MU 10 | 10  | 6.5   | MU 10 | 10   | ≥ 7.5 |

从表 5 和表 6 的比较可以看出, 实验 4 和实验 5 达到 MU 10 的标准, 实验 6 和实验 9 达到 MU 15 的标准。由此可以得出配制 MU 10 和 MU 15 粉煤灰砖的最佳配合比。MU 10 的最佳配合比为:  $A_1B_2C_1D_2$  和  $A_2B_2C_3D_3$ , 具体的配比分别为: 粉煤灰 75%, 水泥 12%, 水 0.20%, 2 # 外加剂; 粉煤灰 70%, 水泥 12%, 水 0.24%, 3 # 外加剂。MU 15 的最佳配合比为:  $A_3B_2C_2D_1$  和  $A_3B_3C_1D_3$ , 具体的配比分别为: 粉煤灰 65%, 水泥 12%, 水 0.22%, 1 # 外

加剂 粉煤灰 65% ,水泥 14% ,水 0.2% ,3 # 外加剂.

### 3 结论

(1) 粉煤灰具有一定的火山灰质材料的活性,但主要以酸性氧化物  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主, $\text{Si}-\text{O}$  和  $\text{Al}-\text{O}$  的键能都很大,在通常的条件下,很难被打破而发生反应,而且反应非常缓慢.粉煤灰玻璃体虽然聚合度大,但它们之间的分散度比较大,不易成型,虽然加有一定量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和水,但仍然呈松散状态,只有在机械压力的作用下,使之加工成具有一定规格形状的砌块.

(2) 水泥在粉煤灰砖中起到了激发剂和粘结剂的双重作用,是提高粉煤灰强度的一个重要因素,考虑到经济性的原则,可找出经济性和强度的最佳结合点,而不要片面追求高的强度指标.此外,各种外加剂也起到了提高粉煤灰强度的作用.

水在试块的制作和养护中起到了很大的作用,在试块的制作中,加入的水过多或过少,试块都很难成型,在养护中,只有在一定水存在的条件下,粉煤灰才可能发生活化反应.

(3) 得出了配制 MU 10 和 MU 15 的最佳配合比,试验编号分别为:实验 4、实验 5 和实验 6、实验 9.

### 参考文献:

- [1] 项明和.高掺量粉煤灰空心砌块的研制[J].粉煤灰综合利用,2001(1):41-42.
- [2] 张丕兴,庄实传.双免粉煤灰小型砌块的研制[J].粉煤灰综合利用,1996(3):34-37.
- [3] 曹淑芝.在水泥砂浆中双掺 FD 外加剂和粉煤灰的试验[J].粉煤灰综合利用,2000(4):15.
- [4] 鄢朝勇,李国栋.用湿排粉煤灰配制高强粉煤灰水泥的研究[J].粉煤灰综合利用,2001(3):22-23.

## Study on Mixture Ratio and Mechanics Performance of the Load-bearing Fly Ash Brick

ZHOU Xiao-ying<sup>1</sup>, XIE Li-li<sup>2</sup>, LIU Li-xin<sup>1</sup>, WANG Ren-yi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. The Comprehensive Design & Research Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The load-bearing fly ash brick is made of cement, fly ash, and etc on. In this paper, the mixture ratio and the compressive strength and the other index of the load-bearing fly ash brick are discussed. Using the method of orthogonal design, one best mixture ratio of all can be obtained by adjusting all kinds of the material mixture ratio, which meet or exceed the target of the fly ash brick at the present. Correlation and efforts of cement, fly ash, water and admixture on compressive strength are presented.

**Key words:** fly ash brick; compressive strength; orthogonal design