

# 矿渣混凝土的力学性能和耐久性试验研究

李嘉琳

(广东省水利水电科学研究院, 广东省水利重点科研基地, 广东 广州 510635)

**摘要:** 为了推广应用矿渣混凝土, 采用等量取代水泥的方法, 研究了30%和60%矿渣混凝土的力学性能和耐久性能, 并与空白混凝土进行对比。研究表明, 矿渣混凝土早期强度比基准混凝土低, 且随掺量增加, 强度降低, 具有线性关系。但随着龄期增长, 矿渣混凝土强度增长更快, 可以赶上并超过基准混凝土。矿渣混凝土28d抗渗性和抗氯离子渗透性优于基准混凝土, 其掺量越大, 作用越明显。

**关键词:** 矿渣; 混凝土; 力学性能; 耐久性能

**中图分类号:** TV42<sup>+</sup>3      **文献标志码:** B      **文章编号:** 1008-0112(2014)05-0067-04

矿渣是炼铁的废渣, 经水或空气急冷处理成为粒状颗粒, 称为粒化高炉矿渣, 其主要化学成分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO等。经水淬急冷后的矿渣, 其玻璃体含量多, 结构处在高能不稳定状态, 潜在活性大, 经磨细才能使其潜能得以充分发挥。粒化高炉矿渣经干燥、磨粉达到适当细度的粉体称为矿渣粉。矿渣粉用作混凝土掺和料, 具有比粉煤灰更高的活性, 而且品质和均匀性更易保证, 掺入混凝土中不仅可以节约水泥、降低胶凝材料的水化热, 而且可以改善混凝土的某些性能, 如显著提高混凝土的强度, 降低混凝土的绝热升温, 提高其抗渗性及对海水、酸及硫酸盐等的抗化学侵蚀能力, 具有抑制碱-骨料反应效果等<sup>[1-2]</sup>。

矿渣的CaO、MgO含量比其他掺和料要高。SiO<sub>2</sub>与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量影响矿渣中玻璃体的含量, 并决定矿渣水硬活性。矿渣粉的活性用碱度*b*来评定:

$$b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad (1)$$

当*b* > 1.4时, 矿渣粉的活性较高。

玻璃相中存在着两相结构, 一种为连续相, 另一

种相呈球状或柱状并均匀分散于连续相中。通过电子探针元素分析可知, 连续相含钙较多, 球状和柱状相含硅较多。由于富钙相是连续相, 富硅相是分散相, 在矿渣玻璃体中, 富钙相相当于胶结物, 维持整个矿渣玻璃体结构的稳定。当富钙相在碱性介质中与OH<sup>-</sup>迅速反应而溶解后, 矿渣玻璃体解体, 富硅相逐渐暴露于碱性介质中, 与OH<sup>-</sup>反应。我国的水淬矿渣的碱度为1.8以上, 玻璃化率在98%以上, 所以这种矿渣很适宜做水泥的掺和料。本文对大掺量矿渣混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、抗渗性能和抗氯离子渗透性等性能进行了系统的研究。

## 1 试验用原材料

采用以下试验用原材料: 韶钢嘉羊公司生产的S95级矿渣粉, 其物理性能见表1; 广州水泥厂生产的P. II型硅酸盐水泥, 其强度等级为42.5R、物理力学性能见表2; 花岗石碎石, 规格为5~20 mm和20~40 mm, 其物理性能见表3; 河砂, 其物理性能见表4; 减水剂为TL-400高效缓凝减水剂。

表1 矿渣粉物理指标

| 烧失量 | 三氧化硫 | 氯离子   | 含水量 | 45um筛余 | 密度                     | 比表面积                                 | 活性系数/% |      | 流动度比 |
|-----|------|-------|-----|--------|------------------------|--------------------------------------|--------|------|------|
|     |      |       |     |        |                        |                                      | 7 d    | 28 d |      |
| /%  | /%   | /%    | /%  | /%     | /(kg·m <sup>-3</sup> ) | /(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) |        |      | /%   |
| 1.7 | 0.03 | 0.010 | 0.6 | 1.4    | 2 900                  | 505                                  | 83     | 98   | 104  |

表2 水泥检验结果

| 水泥品种 | 细度/% | 凝结时间       |            | 抗折强度/MPa |      | 抗压强度/MPa |      |
|------|------|------------|------------|----------|------|----------|------|
|      |      | 初凝         | 终凝         | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 普通水泥 | 4.2  | 3 h 12 min | 4 h 16 min | 5.6      | 8.9  | 26.2     | 51.7 |

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-03-13

作者简介: 李嘉琳(1985), 女, 本科, 助理工程师, 从事项目管理工作。

表3 碎石检验结果

| 规格/mm | 表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 饱和面干表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 吸水率/% | 含泥量/% | 压碎指标/% | 针片状含量/% |
|-------|--|--|--|-------|-------|--------|---------|
| 20~40 | 2 660                                    | 2 640  | 1 360                                    | 0.45  | 0     | 8.5    | 3.8     |
| 5~20  | 2 660                                    | 2 640  | 1 370                                    | 0.47  | 0     |        | 6.1     |

表4 砂检验结果

| 表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 松散堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 细度模数 | 吸水率/% | 含泥量/% | 云母含量/% |
|--|--|------|-------|-------|--------|
| 2 630                                    | 1 440                                      | 2.9  | 1.2   | 1.3   | 0      |

## 2 试验方法

试件成型后采用标准养护, 养护时间为 28 d, 养护室温度为  $20 \pm 2$  °C, 湿度不小于 95%, 试验项目包括抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、渗透系数和抗氯离子渗透性(电量法), 试验方法按《水工混凝土试验规程》SL352-2006 的规定进行。

## 3 试验配合比设计

混凝土配合比设计按《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55-2011 进行。粗细集料以风干状态为基准, 其中 5~20 mm 和 20~40 mm 两种规格碎石的质量百分数分别为 40% 和 60%。矿渣粉等量取代水泥, 掺量为 30% 和 60%。混凝土配合比见表 5, 水胶比为 0.50, 砂率为 36%, 水、胶凝材料、砂、碎石的质量固定, 通过调整外加剂的掺量控制混凝土的坍落度为 5~7 cm。

表5 混凝土配合比

| 试验<br>编号         | 水胶<br>比 | 外加剂掺<br>量/% | 砂率<br>/% | 矿渣粉掺量<br>/% | 坍落度<br>/cm | 每 $\text{m}^3$ 砼材料用量/kg |     |     |     |     |     |     |
|------------------|---------|-------------|----------|-------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                  |         |             |          |             |            | 外加剂                     | 水   | 水泥  | 矿渣粉 | 砂   | 小石  | 中石  |
| 0 <sup>#</sup>   | 0.50    | 0.50        | 36       | 0           | 7.0        | 1.700                   | 170 | 340 | 0   | 680 | 484 | 726 |
| K30 <sup>#</sup> | 0.50    | 0.46        | 36       | 30          | 6.5        | 1.564                   | 170 | 238 | 102 | 680 | 484 | 726 |
| K60 <sup>#</sup> | 0.50    | 0.52        | 36       | 60          | 6.0        | 1.768                   | 170 | 136 | 204 | 680 | 484 | 726 |

由表 5 可见, 与基准混凝土相比, 为了达到相同的坍落度, 采用 30% 矿渣粉时所需外加剂掺量最小, 采用 60% 矿渣粉时外加剂掺量最高, 这主要是由于矿渣粉的颗粒形状、表面组织、细度和级配组成与水泥存在差异, 掺入一定量的矿渣粉有利于改善水泥的级

配组成和粉体的表面性质, 改善了混凝土的工作性, 从而具有减水作用, 减小了外加剂的掺量。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 力学性能

混凝土试验结果见表 6。

表6 混凝土试验结果

| 编号             | 抗压强度/MPa |      |          | 28 d 劈裂抗拉强度/MPa | 28 d 抗折强度/MPa | 28 d 渗透系数/( $10^{-9} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 6 h 电量/C |
|----------------|----------|------|----------|-----------------|---------------|---|----------|
|                | 7 d      | 28 d | 28 d/7 d |                 |               |   |          |
| 0 <sup>#</sup> | 32.3     | 41.5 | 1.28     | 4.2             | 5.4           | 0.67  | 2 613    |
| K30            | 28.4     | 40.6 | 1.43     | 3.9             | 5.1           | 0.53  | 1 865    |
| K60            | 24.9     | 37.8 | 1.52     | 3.8             | 4.7           | 0.44  | 1 480    |

由表 6、图 1 可知, 当试验龄期相同时, 矿渣混凝土试件抗压强度均比基准混凝土低, 且随着掺量增加, 抗压强度降低, 具有线性关系。这是由于矿渣粉中富钙相在碱性介质中与  $\text{OH}^-$  反应而溶解后, 矿渣玻璃体解体, 富硅相逐渐暴露于碱性介质中, 并与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应, 形成凝胶体, 产生强度, 可见矿渣粉的水化反应进程滞后于水泥熟料。早龄期时, 矿渣粉水化作用比较弱, 形成凝胶体产生强度的效应也较小, 因此, 混凝土 7 d 和 28 d 龄期抗压强度比基准混凝土小, 且随矿渣粉掺量的增大而减小。但随着龄期的增长, 硬化混凝土中矿渣粉逐渐水化, 二次水化效应逐渐显现, 混凝土的空隙率减小, 密实程度提高, 力学性能改善, 矿渣混凝土的力学性能可以赶上并超

过基准混凝土。基准混凝土 28 d 抗压强度比 7 d 增长 28%, 30% 矿渣混凝土增长 43%, 而 60% 矿渣混凝土

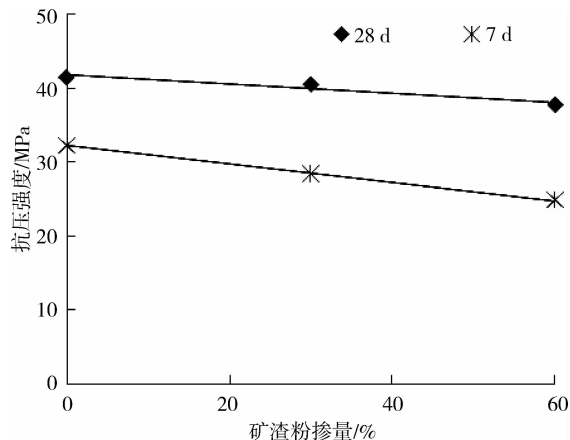


图1 砼抗压强度-矿渣粉掺量关系

增长达到52%，可见，随着龄期的增长，矿渣混凝土抗压强度会有更大的增长，从而减小与基准混凝土的强度差。

由表6、图2可知，当试验龄期相同时，矿渣混凝土试件劈裂抗拉强度和抗折强度均比基准混凝土低，且随着掺量的增加，则抗压强度降低，具有线性关系，与抗压强度具有相似规律。当矿渣与水初始接触时，在矿渣的表面就形成渗透率很低的假晶层，它阻碍了外部水分渗入矿渣颗粒表面，抑制矿渣的溶解，所以较粗的矿渣颗粒可以在相当一段时间内保持一个未水化的内核。但在混凝土后期，细度对矿渣活性指数的影响较小。矿渣粉颗粒越细，混凝土的密实度越高，强度亦越高，渗透性越小，抗氯离子渗透也越小<sup>[3-4]</sup>。

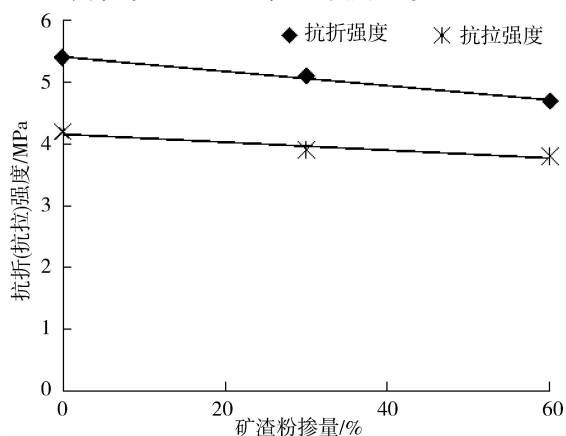


图2 砼抗折(抗拉)强度-矿渣粉掺量关系

#### 4.2 耐久性

混凝土的耐久性问题涉及内容较多，影响因素和破坏机理也很复杂，但其共同点是：都与水或其他有害液体或气体向其内部传输的难易程度有关。混凝土材料的腐蚀大多是在有水及有害液体、气体侵入的条件下发生的。所以，提高混凝土结构的耐久性的关键是增加混凝土材料的密实性，以有效提高其抗渗能力。这样才能阻挡水分、氧气、二氧化碳及有害化学物质的侵入。大量研究表明，混凝土的渗透性与其耐久性之间有着密切的联系，因此通常认为渗透性是评价混凝土耐久性的最重要指标<sup>[5]</sup>。正如有些专家评论的那样：渗透性低的混凝土，其耐久性一般来说是比较好的。

依据试验原理的不同，我国混凝土渗透性试验方法大致可分为两大类：渗透系数法和电参数法。①混凝土渗透系数试验方法：试验采用高度为150 mm的圆台形试件(顶面直径为175 mm，底面直径为185 mm)，6个试件为1组，试验时，将抗渗仪水压力一次加到0.8 MPa，在此压力下恒压24 h，然后降

压，取出试件。试验过程中，当试件端面呈有渗水现象时，即可停止试验，记下渗水时间。将表面未渗水的试件劈开后，测试渗水深度，可计算得到其渗透系数。②混凝土抗氯离子渗透试验方法(电量法)：直流电量法是我国水利行业标准SL352-2006采用的方法，是目前国际上应用最广泛的混凝土渗透性评价方法。直流电量法是利用直流电压作用下，氯离子可以通过混凝土试件向正极方向移动的原理，依据在规定时间内通过混凝土电量的高低来快速评价混凝土抗氯离子渗透的能力。要求试验在20℃~25℃的恒温室内进行。混凝土试件的直径约为100 mm，厚度约为50 mm，试验龄期为56 d，试验前进行真空饱水处理，然后将试件安装于试验槽内。试件量侧槽中分别注入浓度为3%的NaCl溶液和0.3 mol/L的NaOH溶液，两侧铜网对应连接电源的负极和正极。准备就绪后，在电极间施加60 V直流恒电压，并每隔5~30 min记录1次电流值，直至通电6 h。通过绘制电流与时间的关系曲线，即可得到试验6 h所通过的电量(曲线下的面积)。

由表1可知，当矿渣粉掺量由0增大60%时，混凝土的28 d龄期渗透系数由 $0.67 \times 10^{-9}$  cm/s减小至 $0.44 \times 10^{-9}$  cm/s，6h电通量也由2 613 C减小到1 480 C，可见矿渣粉在降低混凝土早期力学性能的同时，可以降低混凝土的渗透性，改善其抗水侵蚀和抗氯离子侵蚀的能力，从而改善混凝土的耐久性，尤其是在氯盐和海水侵蚀环境下的耐久性<sup>[6-7]</sup>。

渗透性是多孔材料的基本性质之一，它反映了材料内部孔隙的大小、数量、分布以及连通等情况。混凝土是一种多孔的、在各种尺度上多相的非均质复合材料。概括地说，混凝土的渗透性是指气体、液体或离子受压力、化学势或电场作用在混凝土中渗透、扩散或迁移的难易程度。它衡量的是混凝土抵抗各种介质入侵的能力，但渗透、扩散及迁移的机理各不相同。渗透是指液体或气体在压力作用下的运动；扩散是指气体或液体中的粒子由于存在浓度差进行的运动；迁移是指液体中的带电粒子在电场作用下的运动。介质在混凝土中传输过程不是单一的，往往是几种传输方式叠加的结果，并在一定的条件下以其中一种方式为主。混凝土的渗透性是反映混凝土材料本身性质的一个参数，与流经混凝土的介质无关，扩散系数或渗透系数都与材料的内部孔隙大小、数量以及连通等情况有关，其间有一定的联系。

混凝土的多孔性决定了混凝土具有一定的渗透性。

混凝土的渗透性主要取决于水泥石的孔结构和骨料的性能。研究表明, 孔隙率并不是影响渗透性的最主要因素, 即使是孔隙率相同的混凝土, 性能也可能有很大差别, 而总孔隙率较高的混凝土, 渗透性也不一定高, 这说明并不是所有的孔隙和裂缝都能成为渗透的通道。Abbas 明确指出, 混凝土的渗透性与孔隙率相关, 但两者之间并不是简单的函数关系, 其渗透性高低主要取决于内部孔隙的连通状况以及渗透路径的曲折性, 即孔结构的特征。P. K. Mehta 试验指出<sup>[10]</sup>, 只有大于 100 nm 的孔才影响混凝土强度和渗透性。小于 50 nm 的孔数量可能反映凝胶数量的多少, 而凝胶数量越多则混凝土的强度越高, 其抗渗性越好。吴中伟教授也认为, 增加 50 nm 以下的孔、减少 100 nm 以上的孔可大大改善混凝土的性能。

混凝土的孔结构随着水化程度的提高和龄期的延长不断变化, 因为有凝胶孔的水泥凝胶体积比未水化的水泥体积增大 1.2 倍, 因而水化产物充填了由拌和水占有的那部分体积。毛细孔体积减小, 凝胶孔体积增加, 同时, 小于 50 nm 的毛细孔隙增多, 大于 50 nm 的毛细孔隙较少。高效减水剂、超细矿物掺合料及其二次水化反应正是通过毛细孔径减小, 阻断孔隙的连通状况以及增加渗透路径的曲折性来大幅改善混凝土的渗透性, 这是矿渣粉能大幅提高混凝土后期的抗渗性能的关键所在。

与渗透性类似, 混凝土的导电性不仅与混凝土的孔隙率相关, 孔隙的连通状况及曲折程度影响更大。矿渣粉不仅通过改变了孔隙液的组成影响混凝土的导电性, 更重要的是通过二次水化反应大幅改善了孔结构, 有害孔减少, 无害或少害孔增多, 增加孔隙的曲折程度, 并阻碍孔隙之间的连通, 从而显著增大混凝土

的电阻, 减小混凝土的导电性, 从而提高混凝土抗海水侵蚀的能力。

## 5 结论

1) 矿渣混凝土早期强度比基准混凝土低, 且随着掺量的增加, 强度则降低, 具有线性关系。但随着龄期的增长, 矿渣混凝土强度的增长更大, 可以赶上并超过基准混凝土。

2) 矿渣混凝土 28d 抗渗性和抗氯离子渗透性优于基准混凝土, 掺量越大, 其作用越明显。

### 参考文献:

- [1] Mehta P K. Concrete durability - fifty year's progress [C] // Proc. Of 2<sup>nd</sup> Inter. Conf. on Concrete Durability, ACI SP126 - 1, 1991: 1 - 31.
- [2] Jau W C, Tsay D S. A Study of the Basic Engineering Properties of Slag Cement Concrete and Its Resistance to Seawater Corrosion [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28 (10): 1 363 - 1 371.
- [3] B. Talling, J. Brandstetr. Present state and future of alkali - activated slag concretes [C] // 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in concrete, American Concrete Institute, 1989: 1 519 - 1 546 (SP114 ~ 74).
- [4] A. M. Boddy, R. D. Hooton, M. D. A. Thomas, The effect of the silica fume on its ability to control alkali - silica reaction [J]. Cement and Concrete Research, 2003(33): 1 263 - 1 268.
- [5] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性 [J]. 公路, 2001, 36(2): 66 - 69.
- [6] 王立华, 陈理达, 刘佳. 矿渣和粉煤灰对胶砂力学性能的影响研究 [J]. 广东水利水电, 2012(3): 19 - 22.
- [7] 王立华, 陈理达, 刘佳, 等. 矿渣和粉煤灰混凝土的抗裂性能研究 [J]. 广东水利水电, 2012(6): 29 - 31.

(本文责任编辑 马克俊)

## Study on the Mechanics Performance and Durability of Slag Concrete

LI Jialin

(Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** Slag powder, with hydraulic characteristics, can save cement as admixture applied directly to the concrete. Through the second hydration reaction, it can improve the durability of concrete. It is essential component especially in concrete in the seawater erosion environment. In this paper, the compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, anti permeability performance and resistance to chloride ion penetration of slag concrete were studied.

**Key words:** slag; concrete; mechanics performance; durability