

文章编号: 1674-9057(2014)03-0532-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2014.03.021

# 利用钢渣作掺合料及骨料的高强混凝土试验

邹小平<sup>a</sup>, 陈平, 刘荣进, 赵艳荣<sup>a</sup>, 韦家骝<sup>a</sup>

(桂林理工大学 a. 材料科学与工程学院; b. 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为提高钢渣的利用率, 利用钢渣与矿渣作掺合料、钢渣作骨料制备成钢渣砂替代碎石, 制备钢渣高强混凝土。通过正交试验研究了水灰比、砂率、钢渣砂掺量、掺合料掺量 4 种因素对钢渣混凝土工作性能、强度的影响, 得出了钢渣混凝土最适宜配合比。采用电通量法研究了最适宜配比钢渣混凝土的氯离子渗透性, 其较基准混凝土要好。通过 SEM 照片对最适宜配合比钢渣混凝土 3、28 d 的微观结构进行了分析, 水化产物较基准混凝土密实。钢渣、矿渣等应用到混凝土中不仅具有环保节能的效果, 还能改善混凝土的性能, 具有良好的经济和社会效益。

**关键词:** 钢渣; 高强混凝土; 氯离子渗透性; 微观结构

**中图分类号:** TU528.31

**文献标志码:** A

在城市化快速发展过程中, 建筑物不断向高层化发展。另外, 随着人类的生产与生活活动向海洋扩展, 大量海洋平台亦将在浅海或深海兴建。这些发展趋势将引导现代化建筑向着高层化、大跨化、重载化及结构轻量化方向发展<sup>[1]</sup>。混凝土作为建筑工程领域中应用最广泛、用量最大的建筑材料, 其随着大规模高层建筑的发展, 混凝土向高强度发展已经是必然趋势<sup>[1]</sup>。混凝土耐久性劣化易导致混凝土开裂, 增加修补、加固费用, 工程使用寿命大大缩短, 重则导致破坏性的工程安全事故<sup>[2]</sup>。高强混凝土因其强度高、耐久性好等诸多特性, 受到广泛关注<sup>[3]</sup>。

钢渣是炼钢工业产生的废渣, 其排放量为钢产量的 10%~20%<sup>[4]</sup>。我国钢渣的年排放量达到了 1 600 万 t 以上, 但其利用率仅约 10%, 主要被用作建筑铺路材料、回填料, 附加值低<sup>[5]</sup>。钢渣用作混凝土掺合料, 可降低水化热, 提高混凝土的耐磨性, 改善混凝土的工作性能、力学性能和耐久性。但是, 由于钢渣含有较大量的 f-CaO、f-MgO 成分, 控制不当易造成安定性不良的后果,

因而限制了其应用、利用率较低<sup>[6]</sup>。当钢渣微粉与矿渣微粉复合作为混凝土掺合料时, 钢渣中的 f-CaO 可以更好的激发矿渣微粉的火山灰反应活性, 而矿渣微粉吸收了钢渣微粉中的 f-CaO 后, 在一定程度上又可以降低由其引起的安定性不良问题, 有助于实现钢渣的高附加值<sup>[6]</sup>。钢渣和矿渣的充分利用, 对减少环境污染、保护地球环境、节约能源和资源具有重要的意义。目前对钢渣的研究均集中在其单独作掺合料及单独作骨料的研究, 且均得到了较好的研究成果, 然而钢渣同时作为掺合料及骨料的研究则很少。

笔者采用矿渣微粉与钢渣微粉作为掺合料、钢渣砂作为骨料部分替代碎石, 制备 C60 钢渣高强混凝土, 研究了混凝土的工作性能及力学性能。

## 1 试验情况

### 1.1 原材料

水泥 (兴安海螺水泥有限公司), P.O 42.5 级; 砂 (桂林本地河砂), 细度模数 2.6, 属中砂; 碎石 (桂林本地矿山碎石), 粒径 5~30 mm 连续级

收稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家高技术研究发展“863”计划项目 (2012AA06A112); 广西科技攻关项目 (桂科攻 12118014-3D)

作者简介: 邹小平 (1989—), 硕士研究生, 研究方向: 绿色建材及工业废渣的资源化利用, zxp\_1025@126.com。

通讯作者: 陈平, 博士, 教授, chenping8383@188.com。

引文格式: 邹小平, 陈平, 刘荣进, 等. 利用钢渣作掺合料及骨料的高强混凝土试验 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34 (3): 532-537.

配，其中 5 ~ 10 mm 为 0% ~ 20%，10 ~ 20 mm 为 25% ~ 75%，20 ~ 30 mm 为 10% ~ 45%，30 mm 以上为 0% ~ 5%；减水剂（AF - CA 聚羧酸系缓凝高效减水剂），减水率为 17.0% ~ 20.0%；水（城市自来水）；矿渣（钢铁厂高炉矿渣），经烘干、粉磨后为白色微粉，密度为 2.86 g/cm<sup>3</sup>，比表面积 430 m<sup>2</sup>/kg；钢渣（柳钢自然冷却的转炉钢渣），经烘干、粉磨后为灰黑色微粉，密度为 3.1 g/cm<sup>3</sup>，比表面积 510 m<sup>2</sup>/kg；钢渣砂，经过筛分的大颗粒钢渣作为钢渣砂，粒度在 5 ~ 10 mm；剑麻纤维（广西剑麻集团），密度 1.43 g/cm<sup>3</sup>，拉伸强度 510 MPa，伸长率 6.0%，长度为 3 cm（表 1）。

1.2 试验方法

参照《水泥比表面积测定法（勃氏法）》（GB/T 8074—2008），测试粉体比表面积；参照《普通混凝土

拌合物性能试验方法》（GB/T 50080—2002），测试混凝土拌合物性能；参照《普通混凝土力学性能试验方法》（GB/T 50081—2002），测试各龄期的混凝土力学性能；参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》（GB/T 50082—2009），测试混凝土 6 h 电通量值。

1.3 试验方案

根据混凝土配合比设计标准，经过大量的初步探索性试验，初步确定了 C60 高强混凝土基准配合比（表 2）。其中：水灰比为 0.32，固定减水剂掺量为胶凝材料质量的 2.5%；纤维是较理想的混凝土增韧材料，为了改善高强混凝土的韧性，特掺入剑麻纤维，其掺量为胶凝材料质量的 0.1%；钢渣微粉与矿渣微粉按 1:1 复合作为掺合料，钢渣砂作为中骨料替代碎石。本试验采用了 L<sub>9</sub>（3<sup>4</sup>）正交试验表进行试验，各因素水平见表 3。

| 表 1 主要原料化学成分                                       |                  |                                |       |      |                 |                                |      |       |                   |
|--|------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|--------------------------------|------|-------|-------------------|
| Table 1 Chemical composition of main raw materials |                  |                                |       |      |                 |                                |      |       | w <sub>B</sub> /% |
|  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | f-CaO | Loss              |
| 水 泥  | 21.44            | 5.85                           | 61.28 | 1.46 | 3.04            | 2.75                           | 4.3  | 0.87  | 4.3               |
| 矿 渣  | 34.72            | 11.69                          | 40.76 | 7.39 | 0.32            | 1.58                           | 0.54 | 0     | 0.01              |
| 钢 渣  | 11.96            | 5.50                           | 42.31 | 9.42 | 2.32            | 21.82                          | 2.98 | 4.79  | 2.75              |

| 表 2 基准混凝土配合比及试验结果   |     |       |      |     |      |          |      |      |
|---|-----|-------|------|-----|------|----------|------|------|
| Table 2 Proportion and experimental result of normal concrete |     |       |      |     |      |          |      |      |
| 混凝土材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )                                 |     |       |      |     | 坍落度/ | 抗压强度/MPa |      |      |
| 水泥  | 砂子  | 碎石    | 减水剂  | 水   | cm   | 3 d      | 7 d  | 28 d |
| 516   | 667 | 1 088 | 12.9 | 165 | 20   | 49.1     | 58.1 | 71.1 |

| 表 3 正交试验的因素水平                                     |            |             |                |                |
|---|------------|-------------|----------------|----------------|
| Table 3 Factor and level of orthogonal experiment |            |             |                |                |
| 水平  | A<br>(水灰比) | B<br>(砂率)/% | C(钢渣砂<br>掺量)/% | D(掺合料<br>掺量)/% |
| 1   | 0.31       | 36          | 10             | 20             |
| 2   | 0.32       | 38          | 20             | 30             |
| 3   | 0.33       | 40          | 30             | 40             |

2 试验结果与分析

正交试验以钢渣混凝土的坍落度和各龄期抗压强度为考核指标，分析各因素对坍落度和抗压强度的影响规律，从而选取最佳试验方案。

2.1 混凝土工作性能分析

由表 4 可知，坍落度最大为 24 cm，最小为 18 cm，说明配制的混凝土和易性比较好，接近工地施工要求。为了更直观地分析试验结果，绘制了各

因素水平对坍落度的影响图。从图 1 可知，水灰比和掺合料掺量是影响坍落度的主要因素，其中水灰比影响最大，其次是掺合料掺量，再次是砂率，而

| 表 4 L <sub>9</sub> （3 <sup>4</sup> ）试验结果                        |      |     |     |     |            |          |      |      |
|---|------|-----|-----|-----|------------|----------|------|------|
| Table 4 Experimental result of L <sub>9</sub> （3 <sup>4</sup> ） |      |     |     |     |            |          |      |      |
| 序号  | A    | B/% | C/% | D/% | 坍落度<br>/cm | 抗压强度/MPa |      |      |
|   |      |     |     |     |            | 3 d      | 7 d  | 28 d |
| F1  | 0.31 | 36  | 10  | 20  | 18         | 29.7     | 44.1 | 63.3 |
| F2  | 0.31 | 38  | 20  | 30  | 20         | 19.4     | 29.9 | 54.1 |
| F3  | 0.31 | 40  | 30  | 40  | 21         | 23       | 36.8 | 57.9 |
| F4  | 0.32 | 36  | 20  | 40  | 20         | 26.9     | 41.1 | 59.5 |
| F5  | 0.32 | 38  | 30  | 20  | 21         | 36.3     | 53.1 | 72.3 |
| F6  | 0.32 | 40  | 10  | 30  | 19         | 23.1     | 34.8 | 55.4 |
| F7  | 0.33 | 36  | 30  | 30  | 22         | 30.2     | 42.3 | 61.4 |
| F8  | 0.33 | 38  | 10  | 40  | 24         | 26.7     | 41.8 | 60.4 |
| F9  | 0.33 | 40  | 20  | 20  | 20         | 36       | 52.3 | 65.1 |

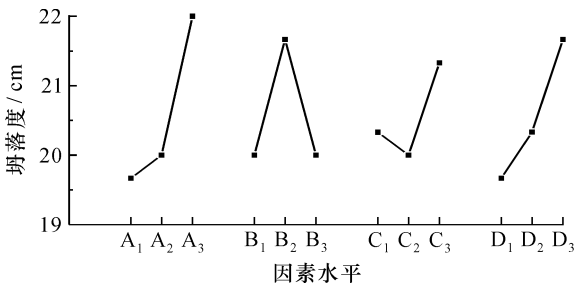


图 1 因素水平对坍落度的影响

Fig. 1 Factor levels on the influence of the slump

钢渣砂掺量对坍落度的影响最小。最佳组合为 A3B2C3D3，即水灰比为 0.33、砂率为 38%、钢渣砂掺量为 30%、掺合料掺量为 40%。

2.2 混凝土各龄期抗压强度分析

根据正交试验极差分析,得到各因素对不同

龄期抗压强度影响分析结果 (表 5、图 2 ~ 图 5)。其中:  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别代表各因素在各个水平下的平均抗压强度值;  $R$  代表极差, 即  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  中的最大值与最小值的差。

试验结果表明:

(1) 掺合料掺量对混凝土强度影响最大 (图 5)。混凝土的各龄期强度均随掺合料掺量的增大先逐渐下降, 之后有小幅增长。当掺合料总量为 30% 时, 混凝土抗压强度达到最低。钢渣微粉、矿渣微粉仅具有潜在水化活性, 生成 C-S-H 凝胶量少, 稀释了水泥中水化产物的“浓度”, 因此掺有矿物掺合料的混凝土强度, 尤其是早期强度总是随掺量的增大有较大的下降<sup>[7]</sup>。掺合料为 20% 时, 混凝土强度最高。

表 5 各因素对抗压强度的影响

Table 5 Influence factors on the compressive strength

|       | 各龄期抗压强度/MPa |      |      |       |      |      |          |      |      |          |      |      |
|-------|-------------|------|------|-------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
|       | 水灰比(A)      |      |      | 砂率(B) |      |      | 钢渣砂掺量(C) |      |      | 掺合料掺量(D) |      |      |
|       | 3 d         | 7 d  | 28 d | 3 d   | 7 d  | 28 d | 3 d      | 7 d  | 28 d | 3 d      | 7 d  | 28 d |
| $K_1$ | 24.0        | 36.9 | 58.4 | 28.9  | 42.5 | 61.4 | 26.5     | 40.2 | 59.7 | 34.0     | 49.8 | 66.9 |
| $K_2$ | 28.8        | 43.0 | 62.4 | 27.5  | 41.6 | 62.3 | 27.4     | 41.1 | 59.6 | 24.2     | 35.7 | 57.0 |
| $K_3$ | 31.0        | 45.5 | 62.3 | 27.4  | 41.3 | 59.5 | 29.8     | 44.1 | 63.9 | 25.5     | 39.9 | 59.3 |
| $R$   | 7.0         | 8.6  | 4.0  | 1.5   | 1.2  | 2.8  | 3.3      | 3.9  | 4.3  | 9.8      | 14.2 | 9.9  |

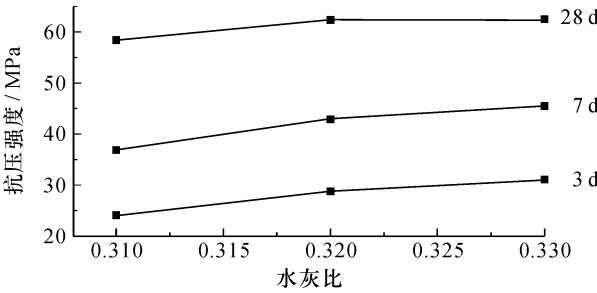


图 2 水灰比对混凝土抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of water-cement ratio on compressive strength of concrete

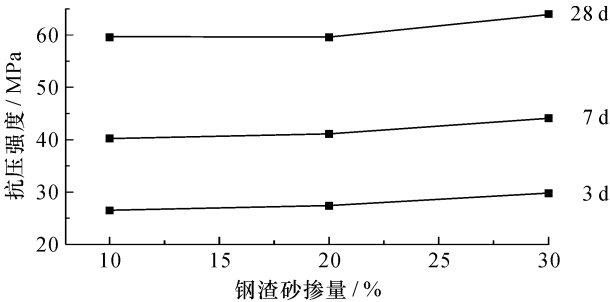


图 4 钢渣砂掺量对混凝土抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of steel sand on compressive strength of concrete

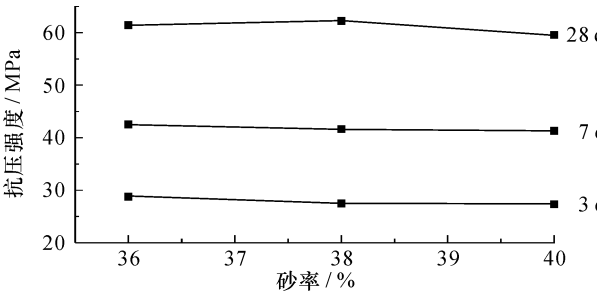


图 3 砂率对混凝土抗压强度的影响

Fig. 3 Influence of sand ratio on compressive strength of concrete

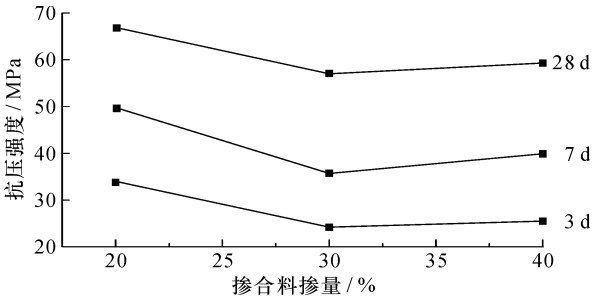


图 5 掺合料掺量对混凝土抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of admixture on compressive strength of concrete

(2) 水灰比对混凝土强度的影响仅次于掺合料掺量(图2)。随着水灰比的增大,混凝土3 d和7 d强度先有较大幅度的增大,之后小幅度增大,而混凝土28 d强度则是先增大后趋于不变。总体来说,水灰比为0.33时,混凝土各龄期强度最高。对一般混凝土而言,混凝土的抗压强度一般与水灰比成反比关系。而本正交试验中,掺合料的掺入导致需水量增加,低水灰比水泥浆体中,水分不足导致浆体中含有大量的未水化水泥熟料颗粒,强度不高;随着水灰比的增大,有足够的水分保证胶凝材料的水化,故强度有一定的增大。

(3) 钢渣砂掺量对混凝土强度的影响弱于水灰比,混凝土各龄期强度均随着钢渣砂掺量的增大而增大(图4)。因为作为细骨料的砂粒粒径都

在5 mm以下;作为粗骨料的碎石,其粒径集中在10~30 mm;而钢渣砂的粒径在5~10 mm,钢渣砂的掺入使得混凝土中多了一种中骨料,使河砂、钢渣砂、碎石3种骨料形成了一种密实的“细-中-粗”结构体系。当钢渣砂掺量为30%时,骨料级配最好,混凝土强度最高。

(4) 砂率对混凝土强度的影响最小(图3),随着砂率的增大,混凝土3 d和7 d强度变化很小,而28 d强度则先小幅度增大后减小,最佳砂率为38%。

从上述坍落度和各龄期抗压强度正交试验数据可知,性能较好、经济效益较好的组合是 $A_3B_2C_3D_1$ ,即水灰比为0.33、砂率38%、钢渣砂掺量为30%、掺合料掺量为20%。钢渣高强混凝土的最佳配合比试验结果见表6。

表6 钢渣混凝土最佳配合比及试验结果  
Table 6 Suitable proportion and experimental result of steel slag concrete

| 编号 | 混凝土材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> ) |    |    |     |     |     |      |      |     | 坍落度<br>/cm | 抗压强度/MPa |      |      |
|----|-------------------------------|----|----|-----|-----|-----|------|------|-----|------------|----------|------|------|
|    | 水泥                            | 矿渣 | 钢渣 | 河砂  | 钢渣砂 | 碎石  | 剑麻   | 减水剂  | 水   |            | 3 d      | 7 d  | 28 d |
| M1 | 413                           | 52 | 52 | 667 | 326 | 762 | 0.52 | 12.9 | 170 | 21         | 37.2     | 54.6 | 72.6 |
| M2 | 413                           | 52 | 52 | 667 | 326 | 762 | 0.52 | 12.9 | 170 | 22         | 37.5     | 55.1 | 73.2 |
| M3 | 413                           | 52 | 52 | 667 | 326 | 762 | 0.52 | 12.9 | 170 | 23         | 36.9     | 53.9 | 71.8 |

2.3 抗氯离子渗透性能试验

混凝土的氯离子扩散性能是混凝土结构寿命测评或评估的重要内容之一。试件在标准养护28 d时采用电通量法对最佳配合比钢渣混凝土做氯离子渗透性试验,其结果见表7。

表7 氯离子渗透性能试验结果  
Table 7 Experimental result of chloride ion permeability properties

| 混凝土种类         | 6 h 电通量/C |
|---------------|-----------|
| 纯水泥混凝土        | 1 663     |
| 掺钢渣微粉与矿渣微粉混凝土 | 713       |

可以看出,掺有10%矿渣微粉和10%钢渣微粉的混凝土的电通量为713 C,明显低于纯水泥混凝土,仅为纯水泥混凝土的1/2左右。因此,掺入钢渣微粉和矿渣微粉后,混凝土的抗氯离子渗透性能大大提高。

3 微观结构分析

利用扫描电镜对各龄期形貌和水化产物进行观察,基准混凝土及钢渣混凝土的水化产物形貌见图6~图9。

从图6可以看出,基准混凝土早期水化产物较多,有一些针状的AFt晶体及无定形的C-S-H凝胶和立方片状CH晶体,但是针状与块状集合体存在较多的空隙。从图7可以看出,早期的钢渣混凝土内部只有少量的粒状、块状的C-S-H凝胶,无针状的AFt晶体,早期强度较低。因为在钢渣、矿渣复合体系中,水泥熟料首先水化,生成C-S-H凝胶和Ca(OH)<sub>2</sub>。Ca(OH)<sub>2</sub>和水泥

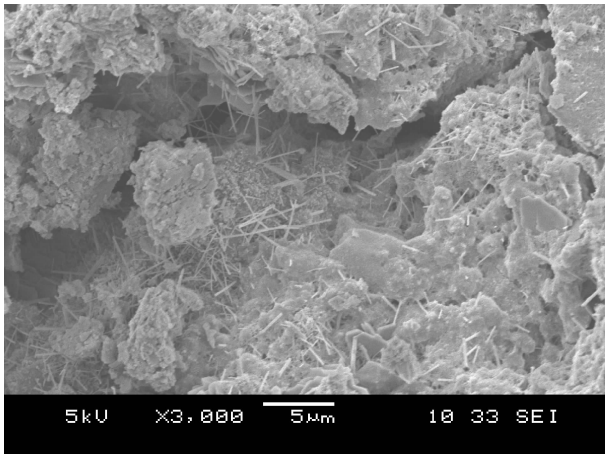


图6 基准混凝土3 d SEM图  
Fig. 6 3 days SEM of normal concrete

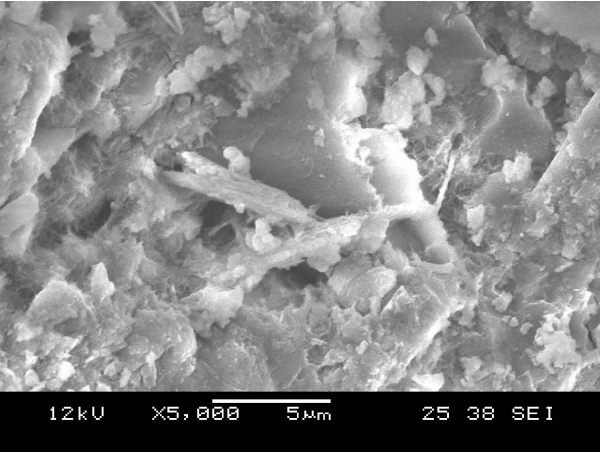


图 7 钢渣混凝土 3 d SEM 图  
Fig. 7 3 days SEM of steel slag concrete

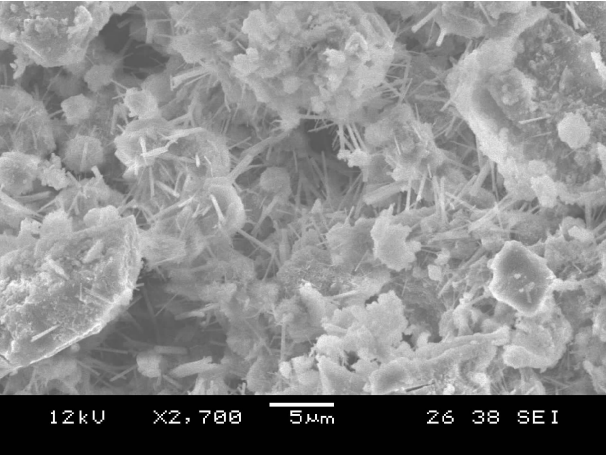


图 8 基准混凝土 28 d SEM 图  
Fig. 8 28 days SEM of normal concrete

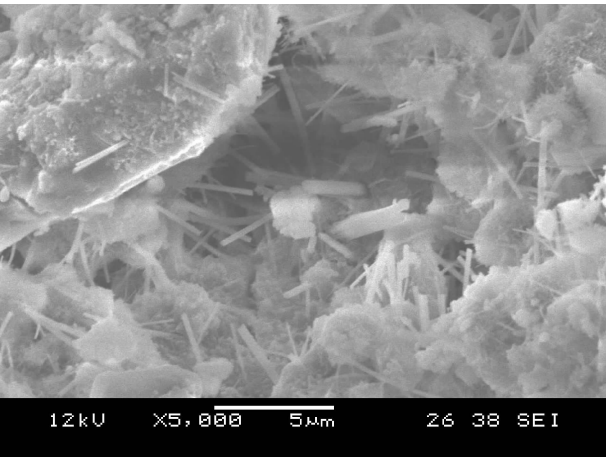


图 9 钢渣混凝土 28 d SEM 图  
Fig. 9 28 days SEM of steel slag concrete

钢渣微粉、矿渣微粉的掺入，使浆体中熟料的比例大大降低，尽管钢渣微粉、矿渣微粉具有一定的活性，但其活性还是远远低于水泥熟料，因此早期生成的水化产物的数量相应减少，减少了颗粒间的连接，相应降低了早期抗压强度。从图 8 可以看出，基准混凝土随着龄期的增长继续水化，水化产物明显增多，产生大量的粒状、块状 C-S-H 凝胶和大量的针状 AFt 晶体。从图 9 可知，钢渣混凝土除了产生大量的粒状、块状 C-S-H 凝胶外，还有大量棒状的 AFt 晶体，且其互相搭接和交叉，密实程度明显高于基准混凝土。这是因为随着水泥水化的进行，体系中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量增加，辅助性胶凝材料在  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  激发下发生火山灰反应生成水硬性物质，减少了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量，改善了界面过渡区的结构，使胶体 C-S-H 界面的粘结力增强，提高了水泥混凝土的后期强度<sup>[8-9]</sup>。

4 结 论

(1) 钢渣微粉与矿渣微粉复掺替代水泥，钢渣砂等量替代碎石，使河砂、钢渣砂、碎石 3 种骨料形成了一种密实的“细-中-粗”结构体系，综合配制出性能优良的绿色密实高强混凝土。

(2) 钢渣-矿渣 C60 高强混凝土的适宜配合比 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 为：水泥 413、钢渣微粉 52、矿渣微粉 52、钢渣砂 326、碎石 762、砂子 667、减水剂 12.9、剑麻纤维 0.52、水 170。

(3) 最适宜配合比钢渣混凝土的电通量为 713 C，明显低于纯水泥混凝土。因此，掺钢渣粉和矿渣粉后，混凝土的抗氯离子渗透性能大大提高。

(4) 钢渣微粉和矿渣微粉作掺合料时，混凝土早期水化较慢，后期充分发挥了钢渣微粉和矿渣微粉的潜在活性，生成的大量 C-S-H 凝胶和棒状 AFt 使混凝土结构更加密实。

参考文献：

[1] 张华英. C80 矿渣高强混凝土的试验研究 [D]. 西安：西北工业大学，2004.  
[2] 刘荣进，陈平，丁庆军，等. 锰渣掺合料对海工混凝土耐久性的影响 [J]. 桂林理工大学学报，2012，32 (2)：233-239.  
[3] 冷发光，王永海，周永祥，等. 高强混凝土的研究应用和

中的石膏可对矿渣、钢渣的水化起到激发作用，使微钢渣粉、矿渣微粉的活性得到最大程度的发挥。

发展趋势 [J]. 商品混凝土, 2011 (2): 25 - 27. - 87.

[4] 黄志斌. 钢渣粉与矿渣粉在混凝土中的应用 [J]. 福建建筑, 2009 (12): 47 - 48. [7] 杨波, 史林. 钢渣混凝土研究现状分析 [J]. 中国新技术新产品, 2011 (7): 11 - 12.

[5] 陈平, 王红喜, 王英, 等. 一种钢渣基新型膨胀剂的制备及其性能 [J]. 桂林工学院学报, 2006, 26(2): 259 - 262. [8] 陈益民, 贺行洋, 李永鑫, 等. 矿物掺合料研究进展及存在的问题 [J]. 材料导报, 2006 (8): 28 - 31.

[6] 薛富民, 胡玉芬, 徐清忠, 等. 钢渣 - 矿渣复掺粉做混凝土掺合料的试验 [J]. 21 世纪建筑材料, 2011 (10): 84 [9] 王申进, 刘加根, 张守治. 矿渣 - 钢渣复合水泥的性能研究 [J]. 水泥, 2011 (9): 14 - 16.

Experiment on high-strength concrete prepared by steel slag used as admixture and aggregate

ZOU Xiao-ping<sup>a</sup>, CHEN Ping, LIU Rong-jin, ZHAO Yan-rong<sup>a</sup>, WEI Jia-zhan<sup>a</sup>

(a. College of Materials Science and Engineering; b. Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metals and Materials, Ministry of Education, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization of steel slag, steel slag and slag as admixture, and as aggregate, a kind of steel slag sand substitute is prepared for gravel for steel slag high-strength concrete. In orthogonal experiments, the factors affecting strength and working performance of concrete including water cement ratio, sand-ratio, the dosage of steel slag sand, the dosage of admixture are studied. So suitable proportion of steel slag concrete is given. Through the use of electric flux, chloride ion permeability of the steel slag concrete with proper proportion is analyzed and proved to be better than that of base concrete. From SEM photos, the microstructure of steel slag concrete at 3 days and 28 days are analyzed, and the extent of compactness is proved to be superior to base concrete. The application of steel slag and slag to the concrete can not only protect environment and save energy, but also improve the comcrete performance, with good economic and social benefits.

**Key words:** steel slag; high-strength concrete; chloride ion permeability; microstructure