

⑤

14-19

# HF 高强耐磨粉煤灰混凝土在黄河大峡水电站工程的应用

高小玲 马向丕

水电三局(甘肃白银 730912)

TV662.2

TV4.3

**摘要** HF 高强耐磨粉煤灰混凝土具有水泥用量低、抗拉强度高、抗冲耐磨性能优质的特点,因此,极少产生裂缝。适用于闸墩及高速水流层混凝土,在钢筋密集的结件使用亦能保证施工质量。文中介绍了 HF 高强耐磨混凝土的性能及在大峡水电站预应力闸墩施工中使用情况。

**关键词** HF 高强 混凝土 试验 应用

**分类号** TU528.2

水电站工程

闸墩, 粉煤灰混凝土

根据黄河大峡水电站二期工程溢洪道预应力闸墩的混凝土设计,我局中心试验室进行了混凝土配合比试验,提出了预应力闸墩混凝土施工配合比,见表1。溢洪道左、右边墩是在间歇了30个月于1996年3月份开始浇筑混凝土的,1996年5月当边墩浇至1465.0m高程时,发现两边墩在完全对称的位置出现裂缝。究其原因:一是,由于高标号混凝土水泥用量多,早期水化热高,引起混凝土内部温升快;二是,虽然是在黄金季节浇的混凝土,但由于西北地区日温差大又经常遭受冷空气袭击,因而内外温差较大,使内、外部混凝土互相约束,产生较大的温度应力,当外部混凝土因收缩产生较大的拉应力超过了混凝土的抗拉强度时,就产生了温度裂缝;再者,也不排除因闸墩长宽比例失调,基础强约束而导致出现裂缝。原因找到后,大峡水电总厂、西北设计院及大峡工程指挥部共同研究,确定采用 HF 外加剂配制的高强耐磨粉煤灰混凝土,它的作用机理是利用 HF 外加剂做激发剂,激发混凝土中掺入的粉煤灰的活性使混凝土达到高强耐磨的效果。

## 1 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土的主要技术指标设计要求

抗压强度设计等级:  $C_{40}(D_{150}), C_{30}(D_{150})$ 。

设计强度保证率:  $P=80\%$ ; 离散系数  $C_v=0.15$ 。

拌合楼出机口混凝土坍落度  $h=7\sim 9$  cm。

混凝土骨料级配为二级配(20~40 cm)及三级配(40~80 cm)。

要求尽可能降低水泥用量,以降低水化热温升,减免混凝土裂缝。

表 1 大峡二期工程预应力同墩混凝土配合比表

| 编 号 | 使用部位     | 设计要求            | 水 灰 比 | 骨料最大粒径 (mm) | 混凝土湿容重 (kg/m <sup>3</sup> ) | 外加剂掺量  |                         |        | 灰 骨 比      | 混凝土用材料 (kg/m <sup>3</sup> ) |       |      |       |       | 外加剂  |         |
|-----|----------|-----------------|-------|-------------|-----------------------------|--------|-------------------------|--------|------------|-----------------------------|-------|------|-------|-------|------|---------|
|     |          |                 |       |             |                             | 木钙 (%) | 松脂皂 (10 <sup>-4</sup> ) | 砂率 (%) |            | 水                           | 水泥    | 砂    | 石     |       |      | 木钙 (kg) |
| I   | 预应力同墩    | C <sub>30</sub> | 0.40  | 砂浆          | 2 200                       | 0.15   | 0.4                     | 100    | 1 : 2.4261 | 575                         | 1 395 | 5~20 | 20~40 | 40~48 | 0.86 | 23      |
|     |          |                 | 0.40  | 40          | 2 420                       | 0.15   | 0.4                     | 30     | 1 : 6.3323 | 313                         | 595   | 693  | 594   |       | 0.47 | 13      |
|     |          |                 | 0.40  | 80          | 2 460                       | 0.15   | 0.4                     | 23     | 1 : 7.9543 | 263                         | 481   | 483  | 483   | 645   | 0.40 | 11      |
| J   | 预应力同墩混凝土 | C <sub>40</sub> | 0.33  | 砂浆          | 2 200                       | 0.15   | 0.4                     | 100    | 1 : 1.8264 | 697                         | 1 273 |      |       |       | 1.05 | 23      |
|     |          |                 | 0.33  | 40          | 2 420                       | 0.15   | 0.4                     | 28     | 1 : 5.0554 | 379                         | 536   | 690  | 690   |       | 0.57 | 15      |

表 2 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土配合比及试验结果

| 编 号            | 水 泥 (kg/m <sup>3</sup> ) | 水 (kg/m <sup>3</sup> ) | 砂 (kg/m <sup>3</sup> ) | 石 (kg/m <sup>3</sup> ) | 外加剂 (kg/m <sup>3</sup> ) | 粉煤灰 F |    | 陷 度 (cm) | W/C   | W/C+F | 抗压强度 (MPa)     |                 |                 | R <sub>28</sub> /R <sub>14</sub> |
|----------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------|----|----------|-------|-------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
|                |                          |                        |                        |                        |                          | 产地    | 用量 |          |       |       | R <sub>7</sub> | R <sub>14</sub> | R <sub>28</sub> |                                  |
| D <sub>1</sub> | 286                      | 125                    | 638                    | 1 320                  | 10.74                    | 二熟    | 72 | 16.5     | 0.437 | 0.349 | 35.6           | 41.3            | 45.8            | 1.11                             |
| D <sub>2</sub> | 286                      | 121                    | 638                    | 1 320                  | 10.74                    | 靖远    | 72 | 7.0      | 0.423 | 0.338 | 40.4           | 46.3            | 52.2            | 1.13                             |
| D <sub>3</sub> | 286                      | 121                    | 638                    | 1 320                  | 10.74/<br>0.537          | 靖远    | 72 | 9.5      | 0.423 | 0.338 | 37.2           | 47.0            | 52.7            | 1.12                             |
| D <sub>7</sub> | 328                      | 130                    | 598                    | 1 295                  | 11.58                    | 靖远    | 75 | 18.0     | 0.396 | 0.322 | 39.7           | 44.7            | 50.7            | 1.13                             |
| D <sub>8</sub> | 266                      | 122.4                  | 649                    | 1 342                  | 9.36                     | 靖远    | 60 | 10.0     | 0.46  | 0.375 | 40.0           | 44.3            | 45.5            | 1.03                             |
| D <sub>9</sub> | 226                      | 120                    | 668                    | 1 380                  | 8.0                      | 靖远    | 52 | 7.0      | 0.531 | 0.432 | 31.4           | 42.2            | 48.5            | 1.15                             |

## 2 材料试验

试验用的材料原则上与 II 期工程混凝土配合比相同, 只将粉煤灰改为靖远电厂 II 级灰, 骨料仍选用小河子滩天然卵石, 砂子仍为小河子滩天然细砂与关家沟粗砂混掺使用。HF 高强耐磨粉煤灰混凝土配合比中粗、细砂的比例为 3:2, 细度模数控制在 2.8, 外加剂为甘肃电力试验研究所生产的 HF 外加剂。

### 2.1 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土配合比及强度

HF 高强耐磨粉煤灰混凝土配合比及强度结果见表 2。从表中看出  $D_9$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  配合比的陪度控制在要求范围内。按照设计要求当混凝土的试配强度分别达到  $C_{90}$  为 34.3 MPa 和 45.8 MPa 即可满足  $C_{30}$  和  $C_{40}$  的设计要求。因此  $D_3$  配方可作为满足  $C_{30}$  强度要求的配合比。 $D_2$ 、 $D_3$  配方可作为满足  $C_{40}$  强度要求的配合比。

### 2.2 HF 高强耐磨粉煤灰的其它性能

#### 2.2.1 抗渗性及抗冻性

一般情况下混凝土的水胶比越小, 混凝土的抗渗标号及抗冻标号越高,  $D_9$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  配方的水胶比分别为 0.432 和 0.338, 经试验  $D_9$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  配方的抗渗标号大于  $S_8$ , 抗冻标号大于  $D_{150}$ 。

#### 2.2.2 HF 高强耐磨粉煤灰砂浆干缩率

混凝土的干缩主要是由于胶凝水化物的干缩引起的, 因而混凝土的干缩性与砂浆干缩性变化规律基本一致, HF 高强耐磨粉煤灰砂浆干缩率试验结果见表 3。从表 3 中看出 HF 高强耐磨粉煤灰砂浆的干缩率, 在同水胶比和同龄期的情况下, 比硅粉砂浆及普通砂浆低。

表 3 HF 高强耐磨粉煤灰砂浆干缩率

| 砂浆品种  | 水胶比   | 掺合料及掺量 | 不同龄期干缩率( $10^{-4}$ ) |      |      |      |       |      |
|-------|-------|--------|----------------------|------|------|------|-------|------|
|       |       |        | 1 d                  | 3 d  | 7 d  | 14 d | 28 d  | 60 d |
| 硅粉砂浆  | 0.5   | 5% SF  | 3.43                 | 4.92 | 6.04 | 7.1  |       | 7.71 |
| 粉煤灰砂浆 | 0.5   | 15% HF | 3.0                  | 3.73 | 4.84 | 5.28 |       | 6.43 |
| 普通砂浆  | 0.261 | 0      | 1.31                 | 3.63 | 6.4  | 8.94 | 11.38 |      |
| 粉煤灰砂浆 | 0.261 | 15% HF | 1.31                 | 3.38 | 5.57 | 7.31 | 11.06 |      |
| 硅粉砂浆  | 0.261 | 15% SF | 1.88                 | 4.23 | 6.44 | 9.1  | 11.63 |      |

#### 2.2.3 HF 粉煤灰混凝土的徐变及弹性模量

由于条件限制, 未进行 HF 粉煤灰混凝土的徐变及弹性模量试验, 但根据中国科学院混凝土研究所主编的《混凝土手册》等资料证实, 粉煤灰混凝土与相同强度的普通混凝土的徐变及弹性模量相当。

## 3 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土配合比的确定

根据 1997 年 10 月 16 日实验结果(见表 2), 推荐 HF 混凝土配合比见表 4。推荐的混凝土配合比具有良好的和易性、保水性和抗离析性, 由于粉煤灰所产生的滚珠效应, 新拌混凝土具

有较小的抗剪能力,易于在外力作用下发生滑动和流动。但在现场施工过程中发现陷度在7~9 cm,混凝土的流动性较差,混凝土拌合物粘结性较强,不易振捣密实。经设计、监理、施工三方讨论,决定加大混凝土陷度并再次进行混凝土配合比试验。因此,在推荐配合比的基础上,把陷度控制在14~16 cm进行试验,结果见表5。从表5中看出, $D_{31}$ 、 $D_{32}$ 、 $D_{33}$ 3个配合比所采用的

表4 推荐HF混凝土配合比单位立方材料用量

| 设计标号 | 水泥  | 粉煤灰 | 水   | HF外加剂 | 砂    | 石    | 引气剂           | 大石:中石:小石 |
|------|-----|-----|-----|-------|------|------|---------------|----------|
| E    | 286 | 72  | 121 | 10.74 | 638  | 1320 |               | 3:2      |
| E    | 286 | 72  | 121 | 10.74 | 638  | 1320 | M-Ca<br>0.537 | 3:2      |
| E    | 667 | 100 | 267 | 10.74 | 1202 |      |               |          |
| D    | 226 | 52  | 121 | 8.0   | 668  | 1360 | 适量            | 3:2      |
| D    | 195 | 40  | 100 | 7.0   | 606  | 1513 | 适量            | 5:3:2    |

注:(1)E等级为 $C_{10}(D_{150})$ ,D等级为 $C_{30}(D_{150})$ 。

(2)掺松脂皂或其它引气剂使混凝土含气量在4%~5%之间。

表5 HF高强耐磨粉煤灰混凝土配合比强度结果

| 编号       | 混凝土材料用量(kg/m <sup>3</sup> ) |            |                        |        |           |      |      | 水灰比   | 水胶比   |
|----------|-----------------------------|------------|------------------------|--------|-----------|------|------|-------|-------|
|          | 水泥                          | 水          | 粉煤灰                    | HF     | 松脂皂       | 砂    | 石    |       |       |
| $D_{31}$ | 300                         | 126        | 76                     | 10.74  |           | 580  | 1355 | 0.42  | 0.335 |
| $D_{32}$ | 286                         | 121        | 72                     | 10.74  |           | 588  | 1370 | 0.423 | 0.338 |
| $D_{33}$ | 314                         | 132        | 80                     | 10.74  |           | 573  | 1338 | 0.42  | 0.335 |
| $D_{34}$ | 223                         | 105        | 47                     | 7.0    | 0.0134    | 540  | 1536 | 0.471 | 0.389 |
| $D_{35}$ | 268                         | 126        | 57                     | 8.0    | 0.0161    | 595  | 1386 | 0.47  | 0.338 |
| $D_{36}$ | 268                         | 126        | 57                     | 8.0    |           | 609  | 1421 | 0.47  | 0.388 |
| $D_{41}$ | 300                         | 126        | 76                     | 10.74  |           | 580  | 1355 | 0.42  | 0.335 |
| 编号       | 砂率(%)                       | 骨料最大粒径(mm) | 容重(kg/m <sup>3</sup> ) | 陷度(cm) | 抗压强度(MPa) |      |      |       |       |
|          |                             |            |                        |        | 3 d       | 7 d  | 14 d | 28 d* |       |
| $D_{31}$ | 30                          | 40         | 2448                   | 15     |           | 37.6 | 45.7 | 51.6  |       |
| $D_{32}$ | 30                          | 40         | 2448                   | 18     |           | 33.8 | 41.0 | 46.3  |       |
| $D_{33}$ | 30                          | 40         | 2448                   | 21.5   |           | 34.3 | 38.4 | 43.3  |       |
| $D_{34}$ | 26                          | 80         | 2458                   | 17     |           | 32.2 | 37.8 | 42.6  |       |
| $D_{35}$ | 30                          | 40         | 2440                   | 13     |           | 25.9 | 30.2 | 34.2  |       |
| $D_{36}$ | 30                          | 40         | 2489                   | 8.2    |           | 35.3 | 44.4 | 49.7  |       |
| $D_{41}$ | 30                          | 40         | 2448                   | 18     | 26.7      | 43.2 |      | 54.3  |       |

\*28 d强度数据是根据经验推算的。

水灰比、水胶比基本相同,只是用水量和陷度不同,随着用水量和陷度的增大混凝土强度递减比较显著;  $D_{31}$  的配方可满足  $C_{40}$  强度要求,  $D_{34}$ 、 $D_{35}$  配方可满足  $C_{30}$  要求,陷度也在要求的范围内。在此试验基础上于 1997 年 1 月 16 日确定了大峡预应力闸墩 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土施工配合比(见表 6),满足了预应力闸墩施工需要。

表 6 大峡闸墩 HF 高强耐磨粉灰混凝土施工配合比表

| 设计标号 | 水胶比   | 骨料最大粒径 (mm) | 砂率 % | 混凝土材料用量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |       |                 |     |     |       |       | 容重 (kg/m <sup>3</sup> ) | 要求陷度 (cm) |       |
|------|-------|-------------|------|------------------------------|-----|-----|-------|-----------------|-----|-----|-------|-------|-------------------------|-----------|-------|
|      |       |             |      | 水                            | 胶凝材 |     | 外加剂   |                 | 砂   |     | 砾石    |       |                         |           |       |
|      |       |             |      |                              | 水泥  | 粉煤灰 | HF    | 松脂皂             | 粗砂  | 细砂  | 80~40 | 40~20 |                         |           | 20~5  |
| E    | 0.335 | 20          | 34   | 145                          | 390 | 43  | 12.4  |                 | 361 | 241 |       |       | 1 170                   | 2 362     | 14~16 |
|      | 0.333 | 40          | 30   | 126                          | 300 | 76  | 10.74 |                 | 348 | 232 |       | 813   | 542                     | 2 448     | 14~16 |
|      | 0.33  | 80          | 26   | 105                          | 255 | 63  | 10.74 |                 | 314 | 209 | 745   | 447   | 298                     | 2 447     | 14~16 |
|      | 0.337 | 砂浆          | 100  | 226                          | 570 | 100 | 10.74 |                 | 776 | 517 |       |       |                         | 2 200     |       |
| D    | 0.388 | 40          | 30   | 126                          | 268 | 57  | 8.0   | 0.6/万<br>0.0161 | 357 | 238 |       |       | 554                     | 2 440     | 14~16 |
|      | 0.388 | 80          | 25   | 105                          | 224 | 47  | 7.0   | 0.6/万<br>0.0134 | 312 | 208 | 778   | 467   | 311                     | 2 459     | 14~16 |
|      | 0.338 | 砂浆          | 100  | 227                          | 518 | 68  | 8.0   | 0.6/万<br>0.0311 | 832 | 555 |       |       |                         | 2 208     |       |

#### 4 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土用于大峡水电站工程中的情况

在溢洪道预应力闸墩施工中,我们先后采用了 3 种配合比,3 种配合比混凝土质量控制见

表 7 溢洪道工程预应力闸墩工程混凝土的强度统计表

| 配合比          | 工程部位   | 浇筑高程               | 施工日期                 | 试验项目    | 混凝土标号 | 要求陷度 | 抽样组数 | 强度值 (MPa) |      |      | 均方差   | 离差系数  | 强度保证率 (%) |
|--------------|--------|--------------------|----------------------|---------|-------|------|------|-----------|------|------|-------|-------|-----------|
|              |        |                    |                      |         |       |      |      | 最大值       | 最小值  | 平均值  |       |       |           |
| I 标配合比       | 左、右边墩  | 1465.0<br>~1466.6  | 1996.3.28<br>~6.17   | 28 d 抗压 | D     | 7~9  | 11   | 39.4      | 29.4 | 33.2 | 2.647 | 0.08  | 88.7      |
|              |        |                    |                      | 28 d 抗拉 | D     | 2    | 2.55 | 2.31      | 2.43 |      |       |       |           |
|              | 左、右边墩  | 1460.0<br>~1465.0  | 1996.4.11<br>~6.17   | 28 d 抗压 | E     | 7~9  | 8    | 49.6      | 29.2 | 38.7 |       |       |           |
|              |        |                    |                      | 28 d 抗拉 | E     | 2    | 2.63 | 2.57      | 2.6  |      |       |       |           |
| HF 推荐比       | 右、右边墩  | 1462.0<br>~1466.0  | 1996.12.17<br>~12.23 | 28 d 抗压 | E     | 7~9  | 7    | 53.0      | 35.6 | 41.0 |       |       |           |
| 最后确定的 HF 配合比 | 左中、右中墩 | 1465.0<br>~1470.28 | 1997.1.16<br>~2.27   | 28 d 抗压 | E     | 14   | 18   | 51.7      | 39.1 | 46.3 | 3.578 | 0.077 | 96.1      |
|              |        |                    |                      | 28 d 抗拉 | E     | ~16  | 5    | 3.58      | 2.56 | 3.05 |       |       |           |
|              | 左中、右中墩 | 1461.0<br>~1478.0  | 1997.1.16<br>~3.27   | 28 d 抗压 | D     | 14   | 39   | 46.7      | 33.6 | 40.2 | 2.744 | 0.068 | 99.9      |
|              |        |                    |                      | 28 d 抗拉 | D     | ~16  | 7    | 3.39      | 2.2  | 2.64 |       |       |           |

注: D 标号  $C_{25}$ , E 标号为  $C_{40}$ 。

见表 7。从表 7 看出,在实际施工中应用的三种配合比抽样检测结果表明,最后确定的 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土配合比,不论是 28 d 抗压强度值,还是离差系数、强度保证率都优于前两种配合比,抗拉强度满足设计要求,强度、强度保证率指标也满足设计要求。D、E 标号的离差系数、强度保证率,评定级别都为“优秀”。D、E 标号抗渗检测各抽检一组,设计抗渗标号为  $S_8$ ,抽检试件的编号为 E<sub>19</sub>(C<sub>40</sub>)、D106(C<sub>30</sub>),两组试件共 12 块,试件加压至 8 kg/cm<sup>2</sup> 均未透水,检测结果为抗渗标号大于  $S_8$ 。弹性模数抽检一组,试件编号为:E<sub>19</sub>,立方体抗压强度为  $C = 44.8$  MPa,圆柱体抗压强度为  $C = 25.1$  MPa,弹性模数为 39.6 GPa,弹性模量符合规律。

综上所述, HF 高强耐磨粉煤灰混凝土用于大峡水电站溢洪道预应力闸墩工程中效果良好,各种指标满足设计要求,可在其它水工混凝土工程中推广应用。

## 5 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土在应用中应注意的事项

采用 HF 高强耐磨粉煤灰混凝土,应根据施工现场实际使用的原材料进行试验,在保证混凝土拌合物的坍落度和和易性符合施工操作要求的前提下,提出最优配合比,保证混凝土的强度及耐久性符合设计要求。

HF 高强耐磨粉煤灰混凝土中所掺用粉煤灰的品质应符合 GB1596—91 国标中 II 级或 I 级灰的标准,有条件时尽量能采用优质灰。

HF 高强耐磨粉煤灰混凝土中掺用的 HF 外加剂须直接以干粉状与水泥或粉煤灰一起加入拌合罐中,也可直接投入拌合罐的干料中,但应避免直接加入无料或仅有拌合用水的料罐中。

进料次序及搅料时间:按粗细骨粒→水泥→粉煤灰(HF 外加剂)的次序投料,拌匀后加水搅拌,总拌合时间应不少于 3 min。

老混凝土基面的处理:老混凝土基面应经打毛处理符合规范要求,冲洗干净并浸水 24 h 使之达饱和状态,铺 2~3 cm 比混凝土高一标号的水泥砂浆或刷基液,方可浇筑 HF 混凝土。

混凝土浇筑收仓后用不沥水湿草袋或塑料薄膜覆盖混凝土表面,以免混凝土表面水分蒸发过快,引起干裂,并加强洒水养护。

### HF Coal Ash Concrete with High Strength and Abrasion Resistance Used in Daxia Hydropower Station on Yellow River

Gao Xiaoling Ma Xiangpi

(No. 3 Hydropower Construction Bureau)

**Abstract** The HF coal ash concrete has the features of high tensile strength, high resistance to abrasion and small quantity of cement use. It seldom cracks when used, therefore, the material is suitable for construction of gate piers and high speed overflow structures. It may ensure the quality of construction when the components with high density of reinforced steels. In this paper, the performance of HF coal ash concrete and its use in pre-stressed gate piers of Daxia Hydropower Station are expounded.

**Key words** HF high strength, Concrete, Test, Use