

# 人工骨料耐磨性及混凝土抗冲耐磨性能试验研究 ——以溪洛渡水电站为例

李光伟, 杨元慧

(国家电力公司成都勘测设计研究院科学研究所, 四川 成都 610071)

**摘要:**对溪洛渡水电站混凝土人工骨料的耐磨性能及混凝土抗冲耐磨性能的试验研究表明, 骨料的品种(特别是细骨料品种)对混凝土抗冲耐磨强度影响很大, 骨料的自身耐磨性能与混凝土抗冲耐磨性能之间存在着一定的关系, 骨料的自身耐磨性能越好, 其混凝土抗冲耐磨强度就越高. 在试验研究的基础上, 提出溪洛渡水电站抗冲耐磨混凝土选用玄武岩人工骨料效果最好.

**关键词:**人工骨料; 耐磨性; 抗冲性; 水工混凝土

**中图分类号:** TU528.041; TV431

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1006-7647(2001)01-0027-04

溪洛渡水电站是金沙江下游河段梯级开发规划的第三个梯级电站, 是一座以发电为主, 兼有防洪、拦沙、漂木和改善下游航运等综合利用效益的特大型水利水电枢纽工程. 工程位于四川省雷波县和云南省永善县接壤的金沙江溪洛渡峡谷. 电站装机 12 000 MW, 拦河大坝采用混凝土双曲拱坝, 最大坝高为 273 m. 溪洛渡工程具有“高水头、大泄量、窄河谷”特点. 其泄洪功率约为 95 000 MW, 为二滩水电站的 2.5 倍, 泄洪总功率属世界水平. 枢纽泄洪以坝身孔口与泄洪洞共同承担, 受泥沙或少量推移质的冲磨, 因而对混凝土抗冲磨性能要求高. 由于工程区域内天然砂砾石质次量少, 不能满足工程需要, 因此, 溪洛渡水电站混凝土选用人工骨料. 工程区域内有灰岩和玄武岩可加工砂石骨料. 鉴于溪洛渡水电站的实际情况, 对玄武岩、灰岩以及玄武岩粗骨料和灰岩细骨料的人工骨料进行耐磨性能试验, 并对相应的人工骨料混凝土进行了冲磨试验, 以探讨不同骨料的耐磨性与混凝土抗冲磨能力之间的关系, 同时对溪洛渡水电站抗冲磨混凝土的人工骨料进行初步选择.

## 1 人工骨料的基本性能试验

### 1.1 母岩的基本特性

溪洛渡电站玄武岩为二叠系上统峨嵋山玄武岩, 灰岩为二叠系下统茅口组石灰岩, 两种岩石的基本特性见表 1. 从母岩的基本特性可以看出, 玄武岩的强度高于灰岩, 密度大于灰岩, 吸水率小于灰岩, 说明玄武岩较灰岩致密.

表 1 岩石基本特性试验结果

| 岩石种类 | 干密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 饱和密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 吸水率<br>/% | 弹性模量<br>/GPa | 抗压强度/MPa |       | 软化系数 |
|------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------|----------|-------|------|
|      |                               |                                |           |              | 干        | 湿     |      |
| 玄武岩  | 2.91                          | 2.93                           | 0.52      | 84.8         | 195.6    | 149.5 | 0.76 |
| 灰岩   | 2.69                          | 2.71                           | 0.75      | 75.1         | 116.8    | 94.4  | 0.81 |

### 1.2 人工骨料的基本特性

各种岩石人工骨料均用颚式破碎机破碎而成, 细骨料选小于 10 mm 的碎石用溢流式棒磨机磨制.

由于岩石抗压强度试验具有加工复杂、强度变异性较大、不能代表骨料在混凝土中真正受力状态等缺点, 所以国外现行标准大都采用压碎指标和 10% 细料值两个指标来评定其强度特性. 10% 细料值是指标准试样在荷载作用下通过标准筛的 10% 细料所对应荷载值. 该值越大, 说明骨料承受抗压荷载的能力也越大. 该值所显示的规律与压碎指标所揭示的规律基本相同. 这两项试验结果的可重复性较好, 其变异系数远小于岩石抗压强度试验所相应值. 因此, 可用压碎指标和 10% 细料值两项指标作为评价人工骨料品质的主要指标<sup>[1]</sup>. 由表 2 可见, 玄武岩类人工骨料的压碎指标较小, 10% 细料值较高, 而灰岩压碎指标较大, 10% 细料值较低, 说明玄武岩类人工骨料的强度高于灰岩人工骨料.

表 2 人工骨料特性试验结果

| 岩石种类 | 粗 骨 料  |         |           | 细 骨 料                         |       |      |        |
|------|--------|---------|-----------|-------------------------------|-------|------|--------|
|      | 压碎指标/% | 针片状含量/% | 10%细料值/kN | 饱和面干视密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 吸水率/% | 细度模数 | 石粉含量/% |
| 玄武岩  | 4.1    | 6.9     | 460       | 2.92                          | 0.70  | 2.92 | 12.3   |
| 灰岩   | 12.0   | 8.1     | 175       | 2.78                          | 0.75  | 2.70 | 12.7   |

作者简介: 李光伟(1962—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 从事水工混凝土性能试验研究.

跌落性能试验是评价混凝土人工骨料性能的一种简洁快速的方法.跌落性能试验是指将一定重量的某一规格的骨料提升到预定高度,然后让其自由跌落,测定其跌落损失.其跌落损失是指某种粒径的骨料经若干次跌落后,小于该粒径的骨料占跌落后该粒径骨料重量的百分比.

玄武岩与灰岩人工骨料的跌落试验结果(表3)表明,在同样条件下,灰岩的跌落损失要大于玄武岩.这是由于灰岩裂隙较发育,易于破碎的缘故.跌落试验结果也证明玄武岩的人工骨料较灰岩人工骨料坚硬.

表3 骨料跌落性能试验结果

| 骨料规格 | 跌落高度<br>/m | 跌落次数 | 骨料跌落损失/% |      |
|------|------------|------|----------|------|
|      |            |      | 灰岩       | 玄武岩  |
| 特大石  | 3          | 10   | 57.2     | 24.7 |
|      | 3          | 20   | 68.8     | 35.2 |
|      | 5          | 10   | 64.1     | 31.7 |
|      | 5          | 20   | 70.2     | 46.2 |
| 大石   | 3          | 20   | 59.6     | 37.8 |
|      | 5          | 20   | 44.9     | 31.5 |
| 中石   | 3          | 20   | 38.0     | 30.1 |
|      | 5          | 20   | 45.9     | 39.5 |

2 人工骨料耐磨性试验

2.1 试验方法简介

目前对骨料的耐磨性进行检测一般是参照ASTM标准中C131和C535方法进行.该方法是采用洛杉矶磨耗机分别对粒径2.5~37.5mm和19~75mm的骨料进行抗磨强度的测定.试验是在一个装有指定数量钢球(按不同骨料级配)的旋转筒中进行的.整个磨蚀过程是骨料与钢球、骨料与骨料之间的撞击、研磨和互相摩擦等联合作用的过程.

C131和C535方法对单一岩石品种各个粒径级配的耐磨性评价是有效的,但难以对两种岩性混合骨料的耐磨性能进行测定.针对溪洛渡电站的实际情况,对C131和C535方法进行了修改和补充,以便比较各种骨料组合耐磨性的优劣.

此方法仍采用C131和C535规定的筛子规格对

骨料进行筛分,将粒径75mm以下、2.5mm以上经不同比例组合后的骨料一起倒入圆筒,放入适量的钢球一起旋转.旋转1000转后,倒出试样,用2.5mm筛进行筛分,将大于2.5mm的骨料洗净、烘干、称重,一种骨料组合为一组试样,试验后比较各骨料组合的磨损率并进行评价<sup>[2]</sup>.

2.2 试验结果及分析

2.2.1 单一岩性人工骨料耐磨性试验结果及评价

采用C131和C535方法对玄武岩和灰岩分别进行试验,试验结果见表4.试验前后骨料粒径变化情况见表5.从表4可以看出,玄武岩和灰岩的磨损率均未超过ASTM标准中C131和C535的规定.不同粒径的玄武岩耐磨性都优于相应的灰岩,如A1级的灰岩磨损率比玄武岩高2倍以上,A、C、D级灰岩磨损率比玄武岩高1倍左右.

表4 玄武岩和灰岩骨料磨损试验结果

| 岩石种类 | 级配           | 孔径<br>/mm | 试验重量<br>/g | 重量合计<br>/g | 磨损率/% |      |      |       |
|------|--------------|-----------|------------|------------|-------|------|------|-------|
|      |              |           |            |            | C131  |      | C535 |       |
|      |              |           |            |            | 100转  | 500转 | 200转 | 1000转 |
| 玄武岩  | A1           | 62        | 2500       | 10020      | —     | —    | 2.8  | 9.6   |
|      |              | 50        | 2520       |            |       |      |      |       |
|      |              | 37        | 5000       |            |       |      |      |       |
|      | A            | 25        | 1250       | 5000       | 3.6   | 12.3 | —    | —     |
|      |              | 19        | 1250       |            |       |      |      |       |
|      |              | 12.5      | 1250       |            |       |      |      |       |
|      |              | 9.3       | 1250       |            |       |      |      |       |
|      | C            | 6.5       | 2500       | 5000       | 3.4   | 12.6 | —    | —     |
|      |              | 4.4       | 2500       |            |       |      |      |       |
|      | D            | 2.5       | 5000       | 5000       | 3.8   | 15.5 | —    | —     |
|      | A1           | 62        | 2515       | 10045      | —     | —    | 9.4  | 30.3  |
|      |              | 50        | 2530       |            |       |      |      |       |
|      |              | 37        | 5000       |            |       |      |      |       |
| 灰岩   | A            | 25        | 1250       | 5000       | 5.9   | 24.5 | —    | —     |
|      |              | 19        | 1250       |            |       |      |      |       |
|      |              | 12.5      | 1250       |            |       |      |      |       |
|      |              | 9.3       | 1250       |            |       |      |      |       |
|      | C            | 6.5       | 2500       | 5000       | 8.0   | 23.4 | —    | —     |
|      |              | 4.5       | 2500       |            |       |      |      |       |
|      | D            | 2.5       | 5000       | 5000       | 6.3   | 25.7 | —    | —     |
|      | ASTM标准骨料技术要求 |           |            |            | <10   | <40  | <10  | <40   |

表5 试验前后骨料粒径变化情况

| 筛孔尺寸<br>/mm | A1(玄武岩)   |           |            | A1(灰岩)    |           |            | A(玄武岩)    |           |            | A(灰岩)     |           |            |
|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|
|             | 试验前<br>/g | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% | 试验前<br>/g | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% | 试验前<br>/g | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% | 试验前<br>/g | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% |
| 62          | 2500      | 645       | 7.1        | 2515      | 0         | 0          | —         | —         | —          | —         | —         | —          |
| 50          | 2520      | 2235      | 24.7       | 2530      | 175       | 25         | —         | —         | —          | —         | —         | —          |
| 37          | 5000      | 3000      | 33.2       | 5000      | 2650      | 37.1       | —         | —         | —          | —         | —         | —          |
| 25          | —         | 2037      | 22.5       | —         | 2306      | 32.9       | 1250      | 575       | 13.1       | 1250      | 353       | 9.3        |
| 19          | —         | 490       | 5.4        | —         | 640       | 9.1        | 1250      | 800       | 18.2       | 1250      | 488       | 12.9       |
| 12.5        | —         | 260       | 2.9        | —         | 390       | 5.6        | 1250      | 930       | 21.2       | 1250      | 650       | 17.2       |
| 9.3         | —         | 127       | 1.4        | —         | 180       | 2.6        | 1250      | 595       | 13.6       | 1250      | 425       | 11.3       |
| 6.5         | —         | 86        | 0.9        | —         | 190       | 2.7        | —         | 640       | 14.6       | —         | 640       | 16.9       |
| 4.5         | —         | 58        | 0.6        | —         | 150       | 2.1        | —         | 400       | 9.1        | —         | 490       | 13.0       |
| 2.5         | —         | 72        | 0.8        | —         | 222       | 3.2        | —         | 318       | 7.3        | —         | 525       | 13.9       |
| 1.9         | —         | 31        | 0.3        | —         | 90        | 1.3        | —         | 115       | 2.6        | —         | 186       | 4.9        |

表 5 为骨料在试验前后粒径变化的情况,对磨损后的骨料进行粒径分析可以看出,在玄武岩 A1 级骨料试验中,玄武岩最大粒径(62mm)的损失率为 74%,而灰岩则损失 100%。从骨料粒径分布来看,灰岩 50~60mm 的大骨料仅占试验后试样重量的 2.5%,而玄武岩为 31.8%。灰岩 25mm 以上粒径骨料占 72.5%,而玄武岩占 87.5%。同样在玄武岩和灰岩的 A 级骨料中也有相应的趋势,也就是说,在同样条件下,玄武岩磨损后大粒径骨料所占比例要大于灰岩,这是由于灰岩硬度较玄武岩低,在磨损过程中易破碎的缘故。

2.2.2 不同骨料组合耐磨性试验结果及评价

针对溪洛渡水电站的实际情况,将骨料分成三种组合,进行不同骨料组合耐磨性试验。一组骨料组合为一级,每级重量为 1250g。三组骨料组合的磨损试验结果见表 6。

表 6 不同骨料组合的磨损试验结果

| 骨料组合             | 粒径分布/mm                 | 试样总量/g | 1000 转磨损率/% |
|------------------|-------------------------|--------|-------------|
| 玄武岩              | 62~2.5                  | 12500  | 10.2        |
| 灰岩               | 62~2.5                  | 12536  | 33.5        |
| 玄武岩(粗)<br>+灰岩(砂) | 62~6.5(玄)<br>4.5~2.5(灰) | 12560  | 19.0        |

表 6 的试验结果表明,玄武岩的耐磨性能最好,灰岩耐磨性能最差,玄武岩粗骨料与灰岩细骨料组合的耐磨性能居于两者之间。

表 7 为试验前后骨料的粒径分布情况,由表中可见,在同一试验条件下,各种骨料组合经磨损后其骨料的级配分布均发生了相应的变化。从最大粒径骨料的损失率来看,玄武岩损失了 10.8%,灰岩损

表 7 试验前后骨料粒径的变化情况

| 筛孔尺寸<br>/mm | 玄武岩       |           |            | 灰岩        |           |            | 玄武岩(粗)+灰岩(砂) |           |            |
|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|--------------|-----------|------------|
|             | 试验前<br>/g | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% | 试验前<br>/g | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% | 试验前<br>/g    | 试验后<br>/g | 分计筛余<br>/% |
| 62          | 1250      | 1115      | 9.9        | 1271      | 535       | 6.4        | 1310         | 878       | 8.6        |
| 50          | 1250      | 545       | 4.9        | 1265      | 766       | 9.2        | 1250         | 630       | 6.2        |
| 37          | 1250      | 1160      | 10.3       | 1250      | 1477      | 17.7       | 1250         | 1118      | 11.0       |
| 25          | 1250      | 1630      | 14.5       | 1250      | 655       | 7.9        | 1250         | 1340      | 13.2       |
| 19          | 1250      | 1030      | 9.2        | 1250      | 550       | 6.6        | 1250         | 1145      | 11.3       |
| 12.5        | 1250      | 1045      | 9.3        | 1250      | 788       | 9.5        | 1250         | 1005      | 9.9        |
| 9.3         | 1250      | 770       | 6.9        | 1250      | 455       | 5.5        | 1250         | 819       | 8.1        |
| 6.5         | 1250      | 950       | 8.5        | 1250      | 648       | 7.8        | 1250         | 935       | 9.2        |
| 4.5         | 1250      | 1249      | 11.1       | 1250      | 966       | 11.6       | 1250         | 1040      | 10.2       |
| 2.5         | 1250      | 1735      | 15.5       | 1250      | 1465      | 17.6       | 1250         | 1250      | 12.3       |

表 8 溪洛渡水电站人工骨料混凝土基本性能

| 骨料种类 |     | 水灰比  | 每 m <sup>3</sup> 混凝土胶<br>材用量/kg | 抗压强度/MPa |      | 劈拉强度/MPa |     | 90d 强灰比 | 90d 拉压比 |
|------|-----|------|---------------------------------|----------|------|----------|-----|---------|---------|
| 粗    | 细   |      |                                 | 28d      | 90d  | 28d      | 90d |         |         |
| 玄武岩  | 玄武岩 | 0.45 | 235                             | 33.0     | 44.9 | 2.4      | 3.3 | 0.191   | 0.073   |
|      |     | 0.55 | 200                             | 23.7     | 38.8 | 1.8      | 2.9 | 0.194   | 0.075   |
| 灰岩   | 灰岩  | 0.45 | 218                             | 30.4     | 41.7 | 3.0      | 3.7 | 0.191   | 0.089   |
|      |     | 0.55 | 186                             | 23.8     | 34.9 | 2.4      | 3.2 | 0.187   | 0.092   |
| 玄武岩  | 灰岩  | 0.45 | 229                             | 34.2     | 45.9 | 2.7      | 3.5 | 0.200   | 0.076   |
|      |     | 0.55 | 196                             | 24.4     | 38.3 | 1.7      | 2.8 | 0.195   | 0.073   |

失了 57.9%,玄武岩粗骨料与灰岩细骨料组合损失了 33.0%。对磨损后骨料的粒径分布进行分析可以看出,粒径 19mm 以上的骨料占骨料总量的百分数分别为:玄武岩 48.8%,灰岩 47.8%,玄武岩粗骨料与灰岩细骨料组合是 50.3%,后者最高。

由以上单一岩性骨料和不同骨料组合的耐磨性能试验结果可以看出:①玄武岩和灰岩的磨损率均未超过 ASTM 标准的规定,但玄武岩的耐磨性能要优于灰岩。②对三种骨料组合的耐磨性能进行比较表明,玄武岩粗骨料与灰岩细骨料的耐磨性能介于玄武岩与灰岩之间,其磨损试验后大粒径骨料的损失要小于玄武岩和灰岩。

3 人工骨料混凝土的抗冲耐磨试验

3.1 人工骨料混凝土的基本力学性能

为了比较不同骨料组合对混凝土基本性能的影响,进行了不同人工骨料组合混凝土基本性能试验研究,结果见表 8。

从混凝土 90d 强度来看,在水胶比相同的情况下,玄武岩混凝土的抗压强度大于灰岩混凝土。以灰岩人工砂代替玄武岩人工砂,对混凝土的强度影响不大。从混凝土 90d 强灰比来看,玄武岩人工骨料与灰岩人工骨料混凝土较接近,而玄武岩粗骨料与灰岩细骨料组合的人工骨料混凝土高于玄武岩人工骨料混凝土。也就是说用灰岩人工砂可以提高玄武岩人工骨料混凝土的水泥效率,其原因在于灰岩人工砂可以有效地弥补玄武岩人工骨料混凝土所存在的骨料粒形较差的缺陷,使骨料间易充填密实。

由混凝土抗拉强度来看,在相同水胶比情况下,

灰岩人工骨料抗拉强度最高,玄武岩人工骨料混凝土的抗拉强度最低.用灰岩人工砂代替相应的玄武岩骨料,可以提高玄武岩人工骨料混凝土的抗拉强度.从混凝土的拉压强度比值来看,灰岩混凝土拉压比最高,玄武岩粗骨料与灰岩细骨料组合的人工骨料混凝土的拉压比要高于玄武岩人工骨料混凝土.

### 3.2 试验结果及分析

按照 SD 105-82《水工混凝土试验规程》的试验方法对不同骨料组合混凝土进行抗冲耐磨性能试验,试验结果见表 9.

#### 3.2.1 骨料品种对混凝土抗冲磨性能的影响

试验结果表明,在水泥品种及混凝土配合比相同情况下,使用不同品种的骨料时,混凝土的冲磨强度相差很大(玄武岩混凝土的冲磨强度要比灰岩混凝土冲磨强度提高 1 倍),可见骨料的品种对冲磨强度具有显著的影响.这是由于混凝土的冲磨强度主要决定于组成材料的抗冲磨性能,而其中骨料的抗冲磨性能对混凝土抗冲磨能力的影响最大<sup>[3]</sup>.

在混凝土配合比及水泥品种相同情况下,当保持混凝土粗骨料品种(玄武岩)不变时,仅仅改变细骨料品种(将玄武岩人工砂代替灰岩人工砂),其混凝土抗冲磨强度提高了 60% 左右;在保持细骨料品种(灰岩)不变情况下,仅仅改变粗骨料品种(将玄武岩代替灰岩作粗骨料),其混凝土的抗冲磨强度可提高 20% 左右.由此可见,不同品种的粗、细骨料对混凝土的抗冲磨强度影响较大.相比而言,细骨料品种的影响要大于粗骨料品种对混凝土抗冲磨强度的影响.这是由于混凝土的冲磨破坏,首先是将混凝土表面的水泥石冲刷掉形成凹坑,使骨料凸现出来,而对于凸出来的骨料而言,其细骨料将首先承受水流的冲刷,因而,在混凝土冲磨破坏的前段,细骨料的自身性能,对混凝土抗冲磨的性能影响要大于粗骨料对混凝土抗冲磨性能的影响.

#### 3.2.2 混凝土强度对混凝土抗冲磨性能的影响

由试验结果可以看出,在骨料品种相同的情况下,混凝土的抗冲磨强度随着混凝土的抗压强度的增加而增高.这是由于当挟砂、石水流对混凝土表面的冲击、摩擦切削等作用力大于混凝土表层材料分子的结合力时,混凝土表层逐渐被磨损.一般情况

下,混凝土中水泥石的抗冲磨性能较骨料差,挟砂、石水流首先将混凝土表面的水泥石的分子与母体分离,使得水泥石逐渐形成凹坑.随着混凝土抗压强度增大,其水泥石的强度也相应增加,因而其混凝土抗冲磨强度也得以增加.

### 3.3 骨料耐磨性与混凝土抗冲磨性能的关系

众所周知,混凝土受挟砂水流冲磨破坏时,是先把其组成材料中耐冲磨性能较差的部分磨掉.若骨料中含有软弱颗粒或骨料的耐冲磨性能较砂浆低,则骨料先被冲磨成凹坑;若骨料比砂浆耐冲磨性能好,则挟砂水流先把砂浆冲磨掉,而粗骨料逐渐凸出(凸出的骨料便主要承受挟砂水流的冲磨作用,对水泥石起到一定的保护作用).因而骨料的耐磨性能对混凝土的抗冲磨性能的影响是显著的.

由试验结果可以看出,在同一试验条件下,耐磨性能好的骨料组合,其混凝土的抗冲磨能力就强,玄武岩骨料的自身耐磨性能好,其混凝土的抗冲磨能力就强;灰岩骨料的自身耐磨性能要逊于玄武岩骨料,其混凝土的抗冲磨强度就低于玄武岩混凝土抗冲磨强度,而采用玄武岩粗骨料和灰岩细骨料的骨料组合,无论是骨料耐磨性能还是混凝土的抗冲磨性能都逊于玄武岩骨料而优于灰岩骨料.显而易见,骨料的耐磨性能(磨损率、磨耗度)与混凝土的抗冲磨强度有着明显的关系,以耐磨性能好的岩石作为人工骨料拌制的混凝土,其抗冲磨强度就高,反之则低.

鉴于溪洛渡水电站的实际情况,对有抗冲磨要求的混凝土部位,应选用玄武岩人工骨料.

## 4 结 语

通过溪洛渡水电站人工骨料耐磨性和混凝土抗冲磨试验研究,可以看出:①骨料的品种(特别是细骨料的品种)对混凝土的抗冲耐磨强度影响甚大;②人工骨料的耐磨性与混凝土抗冲磨能力有着密切的关系,骨料的耐磨性能好,其混凝土抗冲磨能力强,反之则弱;③玄武岩骨料的耐磨性及混凝土的抗冲磨能力均高于其它几种骨料组合及相应的混凝土,针对溪洛渡水电站的实际情况,对于有抗冲耐磨要求的混凝土部位,应选用玄武岩人工骨料.

表 9 人工骨料湿筛混凝土冲磨试验结果

| 骨料种类 |     | 水胶比  | 每 m <sup>3</sup> 混凝土胶<br>材用量/kg | 90 d 抗压强度<br>/MPa | 90 d 磨损率<br>/(kg·(m <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> ) | 抗冲磨强度<br>/(h·(kg·m <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup> ) | 单位强度的<br>抗冲磨强度 |
|------|-----|------|---------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|
| 粗    | 细   |      |                                 |                   |                                                      |                                                    |                |
| 玄武岩  | 玄武岩 | 0.45 | 235.6                           | 44.9              | 1.076                                                | 0.929                                              | 0.021          |
|      |     | 0.55 | 200                             | 38.8              | 1.192                                                | 0.839                                              | 0.022          |
| 灰 岩  | 灰 岩 | 0.45 | 218                             | 41.7              | 2.004                                                | 0.499                                              | 0.012          |
|      |     | 0.55 | 186                             | 34.9              | 2.513                                                | 0.398                                              | 0.011          |
| 玄武岩  | 灰 岩 | 0.45 | 229                             | 45.9              | 1.699                                                | 0.591                                              | 0.013          |
|      |     | 0.55 | 196                             | 38.3              | 2.011                                                | 0.497                                              | 0.013          |

(下转第 68 页)

将以 10% 的年增长率增长,其后的 5 年以 5% 的年增长率增长.法国水务机构(French Water Agencies)相信,如果没有主要用水户组织的广泛支持就不会有如此快的增长速度.

### 2.3 竞争性用途间的水分配

许多国家都在改革传统的水资源分配制度.逐步改变已经不能解决不断增长的水需求压力的以土地为基础或行政划拨的水分配方式.

优化分配是一项复杂而难于解决的问题.分配过程应从确定所有用水户包括环境的相互关系和法定要求开始.按照所有制、水量、可靠性、可转让性和水质等确定明确的水权取决于对水资源和用水类型的深入了解.目前,特别缺乏人类对水循环的影响以及环境需水的了解.

愈来愈多的国家正在致力于确定水环境的用水需要.在澳大利亚墨累河流域,有关研究表明,河流治理对沿河的枫香(Red Gum)森林有不利影响,墨累-达令流域委员会每年分配一定的水量作为专门的森林环境用水量以便重建天然洪水生态.新西兰的资源管理法要求在河道中保留水生态系统所需要的最小流量.英国 30 年来环境流量和其它用水间的竞争具有重要意义,尤其是在干旱地区.在最干旱的 1995,1996 和 1997 年,为维持特殊条件下的供水,目前负责水分配的环境署不得不接受原本不可接受的对水资源的环境影响.

过去 10 年水市场和水权交易的经验愈来愈多,尤其是在美国和澳大利亚.临时出让和永久交易水权鼓励高效用水,使水用于高价值的用途.但必须谨慎控制水交易.对可利用的水资源和用水进行水审计并对总用水量进行限制,可以防止因水交易而造成不能承受的总用水量的增长.为保证水不被用于不适当的用途,如用于存在盐碱化和排水问题的地区或将水从本已紧张的系统调出,应当对水交易加以控制.

在没有建立水市场的国家,人们则尝试采用其它水分配机制.如日本鼓励农民通过灌溉系统的现代化自动放弃部分水权.现代化的部分费用由新用户负担.在德国的黑森州,旧水权到期后都将更换成新的水权.新水权的期限较短并分为两个时段:在第一个时段供水方必须保证供水;在第二个时段,可以收回许可证并不予以补偿——如果监测表明取水方式导致生态或经济破坏时.中国台湾采取了一项发展水权管理的计划,包括确定每个行业 and 用户组织的用水量,确定水权费用,制定水权转让、限制或取消的补偿条例.马来西亚从总体上讲水资源较为丰

富,但降雨的分配不均,干旱保护策略导致一些州寻求跨州和跨流域调水.

未来的水分配将面临艰巨的挑战,货币补偿或其它形式的补偿(如为高效技术提供资金)将发挥重要作用.

### 参考文献:

- [1] OECD. OECD proceedings: water consumption and sustainable water resources management [A]. OCED Publications, Printed in France, 1998.

(收稿日期:2000-11-22 编辑:马敏峰)

(上接第 44 页)

进行 RCC 施工,其中汾河二库是具有综合效益的大型水利枢纽工程,是我国北方首座全断面 RCC 重力坝,在大坝上钻孔取出了长达 7.58 m 的混凝土芯样,是目前国内最长的,测得的透水率远远小于设计标准,再次充分说明了用斜层平推铺筑法施工的 RCC 质量优良可靠.

### 5 结 语

a. 斜层平推铺筑法并非简单的改变层面坡度,它对施工工艺、熟练程度和组织管理均有较高要求,对机械设备性能要求也比较严格.

b. 斜层平推铺筑法通过大大缩短 RCC 层间间隔时间确保了 RCC 层面结合质量的同时,具有经济高效的优越性.长期以来,虽然水电具有成本低、清洁、调峰性能好等优点,但存在一次性投资大、建设周期长的问题,影响了我国的水电开发.目前我国正在进行“厂网分开,竞价上网”的电力体制改革,这一问题将使水电工程在还贷期上网电价过高而难以上网.斜层平推铺筑法作为一种新的 RCC 施工技术,为降低工程造价和缩短建设工期,从而降低水电工程还贷期上网电价开辟了一条途径,在今后我国的水利水电工程建设中将发挥重要作用.

(收稿日期:1999-07-15 编辑:熊水斌)

(上接第 30 页)

### 参考文献:

- [1] 李光伟,吴政.溪洛渡水电站人工骨料全级配混凝土性能试验研究[J].水电站设计,1999(2):101~107.  
[2] 杨元慧,溪洛渡水电站人工骨料耐磨性及混凝土抗冲耐磨性能试验研究[J].水电工程研究,1998(2):1~6.  
[3] 李光伟.骨料性能对混凝土抗冲磨性能的影响[J].水电工程研究,1998(3):20~23.

(收稿日期:1999-07-06 编辑:熊水斌)