

# 外掺 MgO 混凝土的基本力学与长期耐久性能

⑧

李承木

TV431.9

30-35

(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:**对外掺 MgO 微膨胀混凝土的力学强度、弹性模量、抗拉、干缩、徐变变形,抗冻、抗渗、抗侵蚀、抗冲磨、抗碳化等各项基本力学与长期耐久性能以及热学性能进行了全面系统研究,并探索既掺粉煤灰又掺 MgO 对其各项性能的影响。12 年和 20 年的力学与变形资料研究表明, MgO 微膨胀混凝土的长期力学与耐久性能既是安定的又是稳定的,微膨胀对混凝土力学性质的影响不大。

**关键词:** MgO 混凝土; 力学强度; 耐久性能; MgO 膨胀剂

**中图分类号:** TU502

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2000)05-0030-06

氧化镁混凝土

近 20 年来,通过对氧化镁(MgO)混凝土的基础理论和应用研究,在 MgO 水泥化学机理、混凝土变形性能、大坝温度应力补偿和施工工艺控制等方面已形成了一套完整的理论体系,并在我国近 20 座大中型水利水电工程中成功应用。实践证明, MgO 混凝土筑坝技术是国内外筑坝技术的重大创新和突破。

MgO 混凝土筑坝技术是指在生产大坝混凝土时加入适量的、特制的轻烧 MgO,利用其特有的延迟微膨胀性能补偿混凝土坝的收缩和温度变形,以防止产生裂缝。也就是利用 MgO 水化所释放的化学能转变为机械能,使混凝土产生自生体积膨胀,抵消其降温过程的体积收缩。更确切地说,就是利用混凝土的限制膨胀来补偿混凝土的限制收缩,以解决大坝混凝土的抗裂问题。最理想的膨胀发生时间应在水化热最高温升之后,在混凝土显著的降温之前产生膨胀。通过外掺特制的 MgO 和优选水泥品种,可以获得既能满足温控要求,又是比较理想的自生体积膨胀变形过程线。

采用 MgO 混凝土,辅以其它的适当措施,可以做到全部或部分取代传统的混凝土坝温控措施,这不仅有利于解决混凝土坝的开裂问题,而且可以实现长块、厚层、通仓连续浇筑,降低工程造价,简化施工工艺,缩短工期,大大加快施工进度,因此在我国具有重大的技术经济优势和应用发展前景。

## 1 外掺 MgO 混凝土的基本力学与变形性能

试验结合有关水电站工程做了外掺 MgO 混凝土的力学、热学、变形及耐久性等项性能试验研究。

混凝土配合比及 MgO 混凝土力学与变形性能的试验结果参见文献[1]。本试验方法均按水电部 SD105-82《水工混凝土试验规程》中的有关规定进行。

### 1.1 MgO 微膨胀混凝土的力学强度

混凝土的力学强度是混凝土最基本的性能指标,它是建筑物的结构设计和施工质量控制依据,以及作为质量评定的标准。在水工建筑物中,混凝土的抗拉强度又是大体积混凝土抗裂性的重要指标。外掺 MgO 混凝土的强度比不掺 MgO 的强度有所提高,一般抗压强度可提高 3%~6%;抗拉强度可提高 10%左右。由于 MgO 的膨胀作用使混凝土结构更加密实,外掺使单位胶材用量增加,水灰比减小,所以外掺 MgO 混凝土的力学强度有所提高。

MgO 混凝土的抗压和抗拉强度都随试验龄期的增长而增大,随 MgO 掺量的增加而提高,其后期强度的增长是比较大的,如龄期 360d 的抗压强度可为 28d 的 1.6 倍以上。在约束条件下抗压强度的增长率为 6%~10%;抗拉强度增长率为 6%~15%。养护温度对 MgO 混凝土拉、压强度的影响较大,一般可提高 15%和 20%,温度对约束强度的影响更大,一般抗压强度可提高 30%~36%,抗拉强度可提高 26%。试验研究还表明, MgO 混凝土的长期力学性能是安定的,微膨胀对混凝土力学性质的影响不大。

### 1.2 MgO 混凝土的弹性模量

混凝土的弹性模量是温度徐变应力计算中的重要参数。外掺 MgO 混凝土的弹性模量也随龄期的延长而增加,随 MgO 掺量的增加而稍有提高,其增长率一般在 10%以内。当养护温度升高时, MgO 混

土的弹性模量也有所提高,另外试验结果<sup>①</sup>表明,随着粉煤灰掺量增加,混凝土的弹性变形增大,其弹性模量逐渐减小,粉煤灰掺量每增加 10%,弹性模量变化过程线的斜率约减小 20%。

### 1.3 MgO 混凝土的极限拉伸性能

在大坝混凝土的温度控制设计中,一般以轴心受拉的极限拉伸值作为混凝土抗裂性能的主要指标。外掺 MgO 混凝土的极限拉伸值随试验龄期的增长而增大,随 MgO 掺量的增加而提高,如外掺 MgO 为 3.5% 和 4.5% 时,90 d 龄期一般可提高 15% ~ 20%。当养护温度从 20℃ 升至 40℃ 时,外掺 MgO 混凝土极限拉伸值与不掺的相比可提高 22% ~ 28%<sup>[2]</sup>,说明 MgO 混凝土的抗裂性能高于普通混凝土。又如二滩(F<sub>1</sub> ~ F<sub>4</sub>)、铜头(J<sub>1</sub> ~ J<sub>4</sub>)、沙牌(K<sub>1</sub> ~ K<sub>3</sub>)的试验结果表明,F、J、K 各配比混凝土的极限拉伸值都比较大(90 d 龄期的极限拉伸值大于  $1.25 \times 10^{-4}$ ),并且高龄期增加较多,龄期 180 d 的极限拉伸值比 28 d 的提高 15% ~ 23%(K)或 25% ~ 27%(J),这对大坝温控抗裂极为有利。

### 1.4 MgO 微膨胀混凝土的干缩变形

从大量试验结果可以看出:掺 MgO 混凝土的干缩变形率较小,如果与相同配合比的普通混凝土比较,MgO 混凝土的干缩率比普通混凝土的干缩率要小 15% ~ 22%,这对大体积混凝土的抗裂是有利的。大量试验研究结果还表明,掺优质粉煤灰能减少混凝土的干缩变形,如粉煤灰掺量为 20%、30%、40% 时,混凝土的干缩率与不掺的相比分别平均减小 18%、34%、30%,这说明掺粉煤灰同时掺 MgO 能提高混凝土的抗裂性能。

为了比较出现干缩裂缝的敏感性和抗干缩裂缝的能力,采用混凝土的干缩率与弹性模量的乘积除以抗拉强度的比值来评定,其比值越大,裂缝出现的时间越快,抗裂性愈差;反之,混凝土的抗干缩裂缝的性能越好。以 K 种混凝土龄期 7 d 和 28 d 的比值为例,则 MgO 混凝土的比值为 1.07 和 2.06,普通混凝土的比值分别为 1.37 和 3.24,显然普通混凝土的比值大,这说明 MgO 混凝土的干缩抗裂性优于普通混凝土。

关于混凝土干缩的机理比较复杂。由于水泥水化生成晶体和硅酸钙胶体,掺 MgO 后生成较多的水镁石晶体,在水泥颗粒周围生成并具有微膨胀性质,晶体一般不受干燥条件的影响。因此胶体的数量及其特性是支配干缩的主要原因。硅酸钙胶体具有大量的微细孔隙,在干燥条件下,胶体中的自由

水逐渐蒸发产生毛细管引力,胶体孔隙受到压缩,胶体的体积随着水分的蒸发减少而不断收缩。这种胶体的数量及其特性,随着水泥的化学成分不同而不同。在水泥中掺 MgO 后改变了化学成分,水化后其结晶体增多,凝胶体相对减少。由于膨胀作用,使混凝土结构更加密实,从而堵塞毛细管,胶体内部水分蒸发减弱或终止蒸发,使得混凝土的干缩率减小。

### 1.5 混凝土的泊松比

混凝土试体在单纯受压或受拉时,将与试体轴向垂直方向的应变与轴向应变之比称为泊松比。泊松比随应力大小而变化,与材料和配合比的关系不大。采用配比 J 和 K 两种 90 d 龄期的混凝土进行试验,所加荷载为试件强度的 25% ~ 26%,测得大坝混凝土的泊松比平均值为 0.16,符合一般规律。

## 2 外掺 MgO 微膨胀混凝土的徐变变形

混凝土在恒定的持续应力作用下,应变将随着时间的延长而不断增加,这种现象称为混凝土的徐变。在单位应力作用下的徐变变形,称为徐变度,单位为 1/MPa。混凝土徐变度是温度徐变应力计算的必需资料,是一项重要的力学指标。通常徐变变形要比瞬时弹性变形大 1 ~ 3 倍,因此徐变对于温度应力具有很大影响,一般说来,可以使温度应力减少一半左右。配比编号为 J、K 的混凝土徐变度的相对比值见表 1。

### 2.1 掺 MgO 微膨胀混凝土的徐变度

MgO 混凝土徐变的变形规律与普通混凝土徐变一致,都是随着加荷龄期的增加而减小,随持续时间的延长而增大,加荷初期 MgO 混凝土的徐变速率稍大于普通混凝土的徐变速率。如果与相同配合比的普通混凝土比较,外掺 MgO 混凝土的徐变度较普通混凝土的徐变度大,一般说来要大 20% 以上,其增大幅度与 MgO 的掺量有关。如表 1 中,J<sub>2</sub> 的徐变度较 J<sub>1</sub> 的平均增大 22%,J<sub>3</sub> 的徐变度又比 J<sub>2</sub> 的增大 5% 左右。这主要是由于 MgO 具有的膨胀作用,导致掺 MgO 混凝土徐变变形增加的缘故。试验结果还表明,掺 MgO 混凝土的徐变系数也大于普通混凝土,徐变系数大,表示应力松弛大,这对削减集中应力的峰值,减少收缩裂缝和温度应力都是极为有益的。

### 2.2 掺 MgO 掺粉煤灰混凝土的徐变度

徐变与混凝土的强度、水泥品种、加荷龄期、持荷时间、粉煤灰混合材的掺量及灰浆率有关。粉煤灰掺量增加,徐变度增大;MgO 掺量增加,徐变度也增高(见 J<sub>3</sub> 与 J<sub>2</sub> 配比的相对比值)。K<sub>3</sub> 配比的徐变度比

①李承木,沙牌电站基础深槽回填外掺氧化镁混凝土研究(国家“八五”攻关项目),电力工业部成都勘测设计研究院科学研究所,1995

表1 混凝土徐变度的相对比值

| 持荷<br>时间/d | J <sub>2</sub> 配比与 J <sub>1</sub> 配比相对比值 |      |      |      |      |      | J <sub>3</sub> 配比与 J <sub>2</sub> 配比相对比值 |      |      |      |      |      | K <sub>3</sub> 配比与 K <sub>2</sub> 配比相对比值 |      |      |      |      |  |
|------------|------------------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------------------------|------|------|------|------|--|
|            | 3d                                       | 7d   | 28d  | 90d  | 180d | 360d | 3d                                       | 7d   | 28d  | 90d  | 180d | 360d | 3d                                       | 7d   | 28d  | 90d  | 180d |  |
| 3          | 1.24                                     | 1.24 | 1.25 | 1.18 | 1.20 | 1.33 | 1.06                                     | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.06 | 1.49                                     | 1.34 | 1.20 | 1.19 | 1.22 |  |
| 7          | 1.22                                     | 1.24 | 1.24 | 1.22 | 1.23 | 1.26 | 1.05                                     | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.05 | 1.48                                     | 1.33 | 1.17 | 1.15 | 1.17 |  |
| 14         | 1.23                                     | 1.24 | 1.24 | 1.22 | 1.24 | 1.24 | 1.04                                     | 1.04 | 1.04 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 1.45                                     | 1.30 | 1.16 | 1.14 | 1.14 |  |
| 30         | 1.22                                     | 1.22 | 1.23 | 1.23 | 1.25 | 1.24 | 1.03                                     | 1.04 | 1.04 | 1.04 | 1.05 | 1.04 | 1.41                                     | 1.27 | 1.15 | 1.12 | 1.13 |  |
| 90         | 1.24                                     | 1.23 | 1.24 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | 1.03                                     | 1.03 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.36                                     | 1.25 | 1.14 | 1.11 | 1.10 |  |
| 180        | 1.24                                     | 1.23 | 1.23 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | 1.03                                     | 1.03 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.33                                     | 1.23 | 1.14 | 1.10 | 1.09 |  |
| 360        | 1.25                                     | 1.24 | 1.21 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.03                                     | 1.03 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 1.04 | 1.31                                     | 1.22 | 1.14 | 1.10 | 1.09 |  |
| 平均值        | 1.23                                     | 1.23 | 1.23 | 1.21 | 1.22 | 1.24 | 1.04                                     | 1.04 | 1.04 | 1.05 | 1.05 | 1.05 | 1.39                                     | 1.27 | 1.15 | 1.12 | 1.12 |  |

注:①J<sub>1</sub> 配比为不掺 MgO, J<sub>2</sub> 配比为掺 5% MgO, J<sub>3</sub> 配比为掺 6% MgO; ②K<sub>2</sub> 配比为掺 5% MgO, 不掺粉煤灰; K<sub>3</sub> 配比为掺 5% MgO, 掺 30% 粉煤灰。

K<sub>2</sub> 的徐变度大。由于粉煤灰与水泥的火山灰反应是很慢的,在早期几乎无火山灰反应。这是由于粉煤灰的比表面积小,活性也差,所以掺粉煤灰混凝土早期强度低,因此其徐变就大。若将掺粉煤灰混凝土(K<sub>3</sub>)的徐变度与未掺粉煤灰(K<sub>2</sub>)的进行比较,低龄期掺粉煤灰的徐变比不掺的大,3 d 龄期要大 31%~49%,平均大 39%;7 d 龄期大 22%~34%,平均大 27%。高龄期,由于龄期的增长,随着火山灰反应的不不断继续进行,粉煤灰与水泥牢固结合,反应生成的水化物填充水泥石结构的孔隙而使水泥石结构更加紧密,因此只要在适宜的养护条件下,28 d 以后其强度增长较大,故徐变变形减小,所以 180 d 龄期的徐变度掺粉煤灰的比不掺的仅大 12%。掺粉煤灰混凝土各龄期的徐变度都比不掺的徐变度大,总的来看要大 10%~49%,平均大 21%以上。这表明掺粉煤灰同时掺 MgO 混凝土的徐变度大,对提高混凝土的抗裂性能有利。

### 3 外掺 MgO 微膨胀混凝土的耐久性能

外掺 MgO 微膨胀混凝土的长期耐久性能的试验研究成果见表 2 至表 6。

#### 3.1 MgO 混凝土的抗渗性能

从表 2 可见,MgO 微膨胀混凝土具有相当好的抗渗能力。如配比 K<sub>2</sub> 28 d 龄期的抗渗标号就达到 S12,90 d 龄期远远大于 S12;又如掺粉煤灰的配比 K<sub>3</sub> 28 d 龄期的抗渗标号为 S8,90 d 龄期大于 S12,再说配比 J<sub>4</sub> 28 d 龄期的渗透系数为  $0.73083 \times 10^{-9}$  cm/s,相应抗渗标号达到 S16,这说明掺 MgO 混凝土的抗渗标号有较大的提高。

如果将外掺 MgO 混凝土与不掺的比较,前者的抗渗透能力可提高 60%以上。另外高镁水泥掺防水剂可提高抗渗能力 1.5 倍。再将约束混凝土的渗透系数与非约束的比较,即约束的渗透系数为  $0.017 \times 10^{-9}$  cm/s,非约束的为  $0.131 \times 10^{-9}$  cm/s,可见非约束混凝土的渗透系数比约束的大了 7 倍,说明约束混凝土的抗渗透能力有较大提高。由于 MgO 混

凝土的微膨胀作用,使混凝土结构更加密实,其水化生成物填充和切断毛细孔,使孔隙率减小,从而大大增强了混凝土内部的阻水能力,所以外掺 MgO 混凝土比普通混凝土具有更强的抗渗透能力。

表2 MgO 混凝土的抗渗性能

| 配比<br>编号 | 约束条件                | 龄期/d | MgO 掺量<br>/% | 抗压强度<br>/MPa | 抗渗标号 |
|----------|---------------------|------|--------------|--------------|------|
| B        | 自由<br>带模            | 28   | 4            | 38.1         | >S15 |
|          |                     | 28   | 4            | 40.2         | >S30 |
| D        | 自由状态                | 28   | 0            | 18.5         | S6   |
|          |                     | 28   | 3.5          | 18.1         | S8   |
| E        | 自由状态                | 28   | 4.5          | 21.7         | S10  |
|          | 自由状态                | 28   | 0            | 25.1         | S9   |
|          | 自由状态                | 28   | 3.5          | 24.2         | >S12 |
|          | 自由状态                | 28   | 4.5          | 25.9         | >S12 |
| J        | 自由标准养护              | 28   | 5            | 20.7         | >S8  |
|          | 自由标准养护              | 28   | 6            | 19.7         | >S8  |
|          | 自由标准养护              | 28   | 6            | 20.8         | >S12 |
| K        | 自由(K <sub>2</sub> ) | 28   | 5            | 29.0         | S12  |
|          |                     | 90   | 5            | 35.9         | >S12 |
| K        | 自由(K <sub>3</sub> ) | 28   | 5            | 15.9         | S8   |
|          |                     | 90   | 5            | 22.3         | >S12 |

注:除 B 配比为热水雾室养护外,其余均为标准养护室养护。

#### 3.2 MgO 微膨胀混凝土的抗冻性能

混凝土抗冻试验是采用快速冻融法进行的,试验结果列于表 3。从表 3 可见,配比 K 两组掺 MgO 混凝土的抗冻试验结果基本一致,相对动弹性模量下降损失率较少,重量损失率也小。配比 K<sub>3</sub> 的动弹性模量损失率还比比 K<sub>2</sub> 的小 8.5%,这说明掺 MgO 能提高粉煤灰混凝土的抗冻性能。这是由于粉煤灰的火山灰反应和微粉效应以及 MgO 的微膨胀特性所致。

掺 MgO 混凝土的抗冻能力优于普通混凝土。例如 MgO 混凝土在快冻融 33 次以后,相对动弹性模量损失在 50%以下,强度损失在 25%以内,重量损失在 1.5%左右。未掺 MgO 混凝土在冻融 23 次后,动弹性模量就损失了 60%,强度损失了 32%,重量损失 2.4%。又如当 MgO 掺量为 3%和 5%时,结果快速冻融次数达 100 次或 125 次时,MgO 混凝土的各项冻融技术指标都优于普通混凝土。可见外掺

MgO 膨胀剂使混凝土结构更加密实,因此能提高其抗冻性能。

表 3 MgO 混凝土的抗冻性能

| 配比<br>编号 | MgO<br>掺量<br>/% | 快冻融<br>次数 | 慢冻融<br>次数 | 动弹性<br>模量损<br>失/% | 重量<br>损失<br>/% | 强度<br>损失<br>/% | 试后<br>强度<br>/MPa |
|----------|-----------------|-----------|-----------|-------------------|----------------|----------------|------------------|
| E        | 0               | 23        | 92        | 60                | 2.4            | 32             | 25.1             |
|          | 3.5             | 33        | 116       | 46                | 1.0            | 18             | 24.2             |
|          | 4.5             | 33        | 116       | 50                | 2.1            | 28             | 25.9             |
| J        | 5               | 30        | 114       | 14.6              | 1.4            | 8.7            | 27.5             |
|          | 6               | 30        | 114       | 15.1              | 2.7            | 9.8            | 26.9             |
|          | 6               | 30        | 114       | 14.9              | 2.8            | 10.1           | 26.6             |
| K        | 5               | 50        | 150       | 21.7              | 1.3            | 8.6            | 27.6             |
|          | 5               | 50        | 150       | 20.0              | 0.8            |                |                  |
| L        | 0               | 25        | 100       | 2.3               | 0.5            |                | 45.6             |
|          | 0               | 75        | 200       | 12.5              | 1.0            | 6.3            | 42.8             |
|          | 0               | 125       | 300       | 14.7              | 1.9            | 14.6           | 39.0             |
|          | 3               | 25        | 100       | 1.8               | 0.5            |                | 45.1             |
|          | 3               | 75        | 200       | 8.3               | 1.4            | 10.5           | 40.4             |
|          | 3               | 125       | 300       | 10.7              | 2.2            | 11.6           | 39.9             |
|          | 5               | 25        | 100       | 4.3               | 0.5            |                | 44.7             |
|          | 5               | 75        | 200       | 8.2               | 1.9            | 10.4           | 40.0             |
|          | 5               | 125       | 300       | 9.4               | 2.7            | 10.6           | 39.9             |
|          |                 |           |           |                   |                |                |                  |

3.3 MgO 微膨胀混凝土的耐蚀性能

MgO 混凝土抗侵蚀性能的相对试验结果列于表 4。由表 4 可见,在自由状态下,当 MgO 掺量在 5% 以内时,抗压强度的耐蚀系数在 0.946 ~ 0.996 之间,抗拉强度的耐蚀系数为 0.954 ~ 1.079。这表明 MgO 微膨胀混凝土的耐蚀性能略有下降,其耐蚀系数约减小 6%。若在约束条件下,混凝土的强度比自由状态的有较大提高,如 28 d 和 90 d 龄期分别提高 1.8 倍和 2.2 倍<sup>①</sup>。这说明约束条件下的耐蚀性能比自由状态下的要好,由于总孔隙率减少,孔径分布发生变化,使水泥石结构更加密实,所以其耐蚀性得到提高。工程实践证明,在约束条件下,掺 MgO 对混凝土抗蚀性的影响不大,甚至会有所提高。

表 4 MgO 混凝土的耐蚀性能(L 配比)

| 养护<br>条件         | MgO 掺<br>量/% | 抗压强度/MPa |       | 抗拉强度/MPa |      |
|------------------|--------------|----------|-------|----------|------|
|                  |              | 28 d     | 90 d  | 28 d     | 90 d |
| 水中<br>养护         | 0            | 47.50    | 55.70 | 3.81     | 3.93 |
|                  | 3            | 46.55    | 55.73 | 3.83     | 3.93 |
|                  | 5            | 43.70    | 55.10 | 3.99     | 4.12 |
| 硫酸钠<br>溶液中<br>养护 | 0            | 47.12    | 55.34 | 3.99     | 4.24 |
|                  | 3            | 46.36    | 54.39 | 4.12     | 4.24 |
|                  | 5            | 41.36    | 52.73 | 3.87     | 3.93 |

3.4 MgO 微膨胀混凝土的抗冲磨性能

MgO 混凝土的抗冲磨试验结果见表 5。由表 5 可见,当 MgO 掺量为 3% 时,28 d 和 90 d 龄期,混凝土的抗冲磨强度比未掺的分别提高 7.6% 和 4.0%;当 MgO 掺量为 5% 时,可提高 3% 左右。在内掺硅粉

条件下,无论外掺或内掺 MgO 都能提高混凝土的抗冲磨强度,但外掺的效果比内掺的要好。试验还表明,掺硅粉混凝土的抗压强度比未掺的提高 17.74%;掺硅粉同时又掺 MgO 混凝土的抗压强度比未掺的提高 21.81%。在约束条件下,MgO 掺量为 5% 时,外掺 MgO 混凝土 28 d 和 90 d 龄期的抗冲磨强度比内掺的分别提高 7.05% 和 7.10%。在上述约束条件下的抗冲磨强度比自由状态下的提高 5%。

表 5 MgO 混凝土的抗冲磨性能(M 配比)

| MgO 及硅粉<br>掺入方式    | MgO 掺<br>量/% | 抗压强度/MPa |       | 抗冲磨强度<br>/(h·(kg·cm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup> ) |       |
|--------------------|--------------|----------|-------|-----------------------------------------------------|-------|
|                    |              | 28 d     | 90 d  | 28 d                                                | 90 d  |
| 外掺 MgO             | 0            | 47.11    | 48.44 | 1.184                                               | 1.229 |
|                    | 3            | 51.33    | 54.07 | 1.274                                               | 1.278 |
|                    | 5            | 49.33    | 51.56 | 1.214                                               | 1.235 |
| 内掺 MgO             | 0            | 47.11    | 48.44 | 1.184                                               | 1.229 |
|                    | 3            | 48.58    | 49.80 | 1.082                                               | 1.266 |
|                    | 5            | 47.60    | 48.71 | 1.144                                               | 1.165 |
| 内掺硅粉 10%<br>内掺 MgO | 0            | 48.15    | 50.59 | 0.965                                               | 1.152 |
|                    | 3            | 50.52    | 52.00 | 1.046                                               | 1.150 |
|                    | 5            | 48.90    | 50.70 | 0.982                                               | 1.094 |
| 未掺硅粉               | 0            | 54.10    |       | 1.439                                               |       |
| 内掺硅粉 10%<br>外掺 MgO | 0            | 63.70    |       | 1.768                                               |       |
|                    | 4            | 65.90    |       | 1.443                                               |       |
| 约束内掺               | 5            | 49.00    | 52.23 | 1.191                                               | 1.202 |
| 约束外掺               | 5            | 51.70    | 53.12 | 1.275                                               | 1.287 |

综合上述分析可以认为,只要 MgO 掺量控制适当,不降低混凝土的抗压强度,掺 MgO 能够提高微膨胀混凝土的抗冲磨强度,一般说来可提高 5% ~ 7%。在约束条件下的抗冲磨性能比自由膨胀状态的性能要好。近年来的研究表明,掺粉煤灰同时掺硅粉和 MgO 是提高混凝土耐久性能的又一条新途径。

3.5 MgO 微膨胀混凝土的碳化试验

混凝土碳化与空气中 CO<sub>2</sub> 的浓度、环境湿度、养护条件、水灰比、振实程度、水泥品种及用量、混合材掺量以及龄期等有关。碳化影响混凝土的耐久性,对防止钢筋混凝土中钢筋的锈蚀不利。碳化还会引起混凝土收缩,当这种收缩受到限制时,往往引起表面微裂缝。熟料太少的混凝土碳化后其强度降低。因此,对于重要工程,应该重视和研究混凝土的抗老化能力。

混凝土碳化试验是在 HRD-2 型自控式碳化试验箱里进行的,试件尺寸为 10 cm × 10 cm × 40 cm,试件养护龄期为 28 d。试验方法严格按照国家标准 GBJ82-85 中的规定进行。试验结果列于表 6。从表 6 可以看出:在连续碳化 28 d 后,不掺粉煤灰混凝土(K<sub>2</sub>)、掺与不掺 MgO 的碳化深度分别为 22.7 mm 和 23.3 mm,掺 MgO 的比不掺的减小 2.24% (各龄期测值总平均小

① 刘峥等.氧化镁延迟性膨胀水泥的基本性质.南京化工学院,1989.11~13.

9.35%);掺粉煤灰混凝土(K<sub>3</sub>),参与不掺 MgO 的碳化深度分别为 23.8 mm 和 36.3 mm,掺 MgO 的比不掺的减小 34.3%(总平均小 38.2%)。当都不掺 MgO 时,掺粉煤灰 30%的碳化深度比不掺的大 56.1%(总平均大 65.8%),这是由于掺粉煤灰后,水泥熟料含量减少,液相碱度降低,不仅使氢氧化钙碳化,而且其它含钙水化物也因碱度降低而分解进行碳化,致使碳化速度加快所致。当都外掺 5% MgO 时,掺粉煤灰的碳化深度比不掺的仅大 4.9%,这是由于 MgO 的膨胀作用,使混凝土内部的孔结构发生极大变化,混凝土更加密实,使碳化减慢,所以外掺 MgO 能降低粉煤灰混凝土的碳化深度。根据上述分析,可以得出混凝土碳化的一般规律,即随着碳化龄期的增长而碳化深度逐渐增加;掺粉煤灰后混凝土的碳化速度加快,其碳化深度增大;外掺 MgO 能使碳化减慢,从而提高粉煤灰混凝土的抗碳化能力。

表 6 MgO 混凝土的碳化试验

| 配比<br>编号       | 粉煤<br>灰掺<br>量/% | MgO<br>掺量<br>/% | 各龄期的碳化深度 H/mm |          |          |          |          |
|----------------|-----------------|-----------------|---------------|----------|----------|----------|----------|
|                |                 |                 | 3 d           | 7 d      | 14 d     | 21 d     | 28 d     |
| K <sub>2</sub> | 0               | 0               | 9.7(28)       | 13.2(24) | 16.5(24) | 20.4(24) | 23.3(24) |
|                |                 | 5               | 8.6(26)       | 12.1(26) | 14.4(24) | 18.1(24) | 22.7(24) |
| K <sub>3</sub> | 30              | 0               | 17.8(26)      | 21.2(24) | 28.2(24) | 32.4(24) | 36.3(24) |
|                |                 | 5               | 9.6(28)       | 13.4(30) | 17.3(26) | 20.9(24) | 23.8(24) |

注:①括号内数据为测点数;②K<sub>3</sub> 配比碳化深度计算式为:未掺 MgO 时,  $H = 54.45 \times [1 - \exp(-0.207\tau^{0.488})]$ ; MgO 掺量 5% 时,  $H = 35.70 \times [1 - \exp(-0.165\tau^{0.552})]$ 。

#### 4 外掺 MgO 水泥及混凝土的热学性能

a. 试验结果<sup>[3]①②</sup>表明,外掺 MgO 水泥水化热略有增加,其增加范围一般在 5% 以内,热峰出现时间推迟, MgO 对水泥的凝结硬化有一定的延缓作用。掺粉煤灰同时掺 MgO 水泥的水化热降低,笔者的研究表明<sup>③</sup>,粉煤灰掺量每增加 10%,水泥的水化热下降 7.681%,这对大坝温控防裂有利。

b. 大量试验研究表明,混凝土的导温、导热、比

热、热膨胀系数等,它们的性质主要取决于混凝土骨料的性能及骨料用量的多少,龄期的影响很小。骨料对混凝土热学性能的影响最大,一方面由于岩石种类不同,其热学性能差异很大;另一方面水工混凝土的骨料占混凝土总量的 80%~90%,所以岩性对混凝土的热学性能起主导作用。温度的改变及用水量的增加对混凝土热学性能的变化不可忽视。掺粉煤灰、掺 MgO 对混凝土的热学性能系数的影响不明显。

c. 混凝土绝热温升的试验成果见表 7。它是在绝热条件下,直接测定混凝土由于水泥水化热而产生的温度升高值。大量试验研究表明,绝热温升受很多因素影响,其中水泥用量是最直接的主要影响因素,水泥用量多的绝热温升值较高,反之则低。根据铜头(J)和铜街子现场实测资料看,小级配混凝土的绝热温升值略高于大级配的温升值;外掺 MgO 混凝土的绝热温升值比同种混凝土未掺 MgO 的稍大(其值可大 3% 左右);掺粉煤灰能降低混凝土的绝热温升值,而且热峰的发散速度减慢,这对抗裂有利。

试验结果表明,沙牌(K)基础混凝土掺 30% 粉煤灰的绝热温升比不掺的 3 d, 7 d, 28 d 龄期分别降低 5.39℃, 5.11℃, 4.49℃,总的说来可降低混凝土绝热温升 5℃ 左右,平均下降率为 23.91%,但 3 d 龄期的下降率较大,这说明粉煤灰初期水化慢,混凝土绝热温升值小,符合一般规律。

#### 5 长龄期对 MgO 混凝土力学强度的影响

长龄期 MgO 混凝土的抗压强度试验是在下述条件下实现的:将自生体积变形试件和徐变试验中的对比试件,据不同养护龄期,加工成 15 cm 立方体试件,然后测定其抗压强度。如试验龄期 2 a 的江山水泥,掺 4% 和 6% MgO 的混凝土的抗压强度比不掺 MgO 的分别提高 7.5% 和 14.6%;在相同龄期与试验条件下,峨眉水泥则分别提高 5.3% 和 12.0%。这表明掺 MgO 混凝土的长期力学强度是安定的。

表 7 混凝土绝热温升试验结果

| 配比编号           | 粉煤灰掺量/% | MgO 掺量/% | 水灰比  | 各测试时间的绝热温升值/℃ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                                  |  | 经验式 $T_r = \frac{mI}{n+t}$ |
|----------------|---------|----------|------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------------------------|--|----------------------------|
|                |         |          |      | 1d            | 2d   | 3d   | 4d   | 5d   | 7d   | 10d  | 14d  | 20d  | 28d  |                                  |  |                            |
| J <sub>1</sub> | 25      | 0        | 0.65 | 7.7           | 12.2 | 15.1 | 17.2 | 18.7 | 20.7 | 22.6 | 24.1 | 26.3 | 26.2 | $T_r = \frac{28.650t}{2.6721+t}$ |  |                            |
| J <sub>2</sub> | 25      | 5        | 0.65 | 7.9           | 12.5 | 15.4 | 17.6 | 19.1 | 21.3 | 23.3 | 24.8 | 26.1 | 27.0 | $T_r = \frac{29.720t}{2.7725+t}$ |  |                            |
| K <sub>1</sub> | 0       | 0        | 0.55 | 11.1          | 14.5 | 19.5 | 23.1 | 25.0 | 25.6 | 26.0 | 26.3 | 27.1 | 27.6 | $T_r = \frac{28.903t}{1.2561+t}$ |  |                            |
| K <sub>2</sub> | 0       | 5        | 0.55 | 11.4          | 14.9 | 20.2 | 23.9 | 25.7 | 26.4 | 26.8 | 27.2 | 27.9 | 28.5 | $T_r = \frac{30.612t}{1.8283+t}$ |  |                            |
| K <sub>3</sub> | 30      | 5        | 0.55 | 6.8           | 9.0  | 14.8 | 16.6 | 19.2 | 21.3 | 22.3 | 22.5 | 23.4 | 24.0 | $T_r = \frac{26.248t}{2.4510+t}$ |  |                            |

①李承木,氧化镁微膨胀混凝土的基本性能研究,见:氧化镁混凝土筑坝技术文集,电力工业部水利水电规划设计总院,1994。

②李承木,沙牌电站基础深槽回填外掺氧化镁混凝土研究(国家“八五”攻关项目),电力工业部成都勘测设计研究院科学研究所,1995。

表8列出了两种内含MgO水泥( $A_1, A_2$ )和外掺MgO水泥( $G_2$ )混凝土长龄期的实测抗压强度,若以配比 $A_1, A_2$  1a的强度为基准值,则龄期为2a至12a的11组抗压强度略有降低,其降低范围在1.2%~5.8%以内,平均仅为3.4%。这是因为试件长期处于密封绝湿状态,又长期置于徐变室内绝湿条件养护所导致的结果。如果将龄期为10a和12a的抗压强度与1a的强度比较,分别只降低了1.8%和3.5%。再将配比 $G_2$ 外掺MgO的龄期为5a和10a的抗压强度与其1a的强度比较,分别也只降低了3.1%和4.7%。这个试验结果说明,掺MgO混凝土的膨胀对其长龄期强度降低的影响不大。如果试件长期置于标准条件(水分充足)下养护或处于实际工程状态(有一定约束)下,混凝土的强度不但不会降低,而且还会有所提高。大量实践表明,如果混凝土的自由膨胀率控制在 $500 \times 10^{-6}$ 以内,一般膨胀变形对混凝土强度的降低不会有多大的影响。另据我国建材部门对混凝土强度与自由膨胀变形两者关系的试验结果证明,当自生体积变形从 $(250 \sim 300) \times 10^{-6}$ 强度开始下降,达到 $500 \times 10^{-6}$ 时,强度开始急剧下降。当其自生体积变形在 $(150 \sim 250) \times 10^{-6}$ 时,混凝土的强度最高。

表8 MgO微膨胀混凝土长龄期的力学性能

| 试验龄期<br>/d | 抗压强度/MPa |       |           | 弹性模量/GPa |       |
|------------|----------|-------|-----------|----------|-------|
|            | $A_1$    | $A_2$ | $G_2$     | $A_1$    | $A_2$ |
| 3          | 12.20    | —     | —         | 11.8     | —     |
| 7          | 15.70    | 5.90  | 13.38     | 16.0     | 15.0  |
| 28         | 26.58    | 14.22 | 23.80     | 22.1     | 19.6  |
| 90         | 30.50    | 21.97 | 34.64     | 24.1     | 23.7  |
| 180        | 33.15    | 25.00 | 36.61     | 24.9     | 26.3  |
| 365        | 33.34    | 25.11 | 40.80     | 26.0     | 28.2  |
| 730        | 32.17    | 24.81 | —         | 27.2     | 29.4  |
| 1080       | 32.10    | 23.93 | —         | 28.2     | 30.1  |
| 1509       | 32.07    | 24.67 | 39.54(5a) | 29.1     | 30.4  |
| 2744       | 31.87    | 23.64 | —         | 29.8     | 30.6  |
| 3600       | 32.75    | 24.00 | 38.89     | 30.2     | 30.8  |
| 4320       | —        | 24.22 | —         | —        | 31.0  |

表8中长龄期的弹性模量还一直保持增长趋势,其值也未出现降低现象。况且用于大体积混凝土的补偿收缩膨胀量只需 $200 \times 10^{-6}$ 左右就能满足要求。

根据东北勘测设计研究院于1996年对白山大坝进行安全鉴定时的资料,基础混凝土钻孔取芯的20a龄期的立方体强度均值为40.72 MPa,施工期机口取样抗压强度的平均值为34.90 MPa,可见20a后MgO微膨胀混凝土的抗压强度较施工期的强度提高了16.7%。芯样的动弹性模量均值则为39.1 GPa,与抗压弹性模量的平均值37.0 GPa相近,表明试验成果是可靠的。

上述长龄期混凝土力学强度的试验结果表明,

MgO微膨胀水泥混凝土的长期力学性能是安定的,微膨胀对混凝土力学性质的影响不大。

## 6 结 论

a. 外掺MgO混凝土的力学及变形性能都比普通混凝土的各项性能有所提高,一般可提高6%左右。MgO混凝土的徐变和极限拉伸值较普通混凝土大20%以上,干缩变形率比普通混凝土的要小15%~22%。外掺MgO对水泥水化热和混凝土绝热温升的影响不大(其值稍高3%~5%);对混凝土的导热、导热、比热容和热膨胀系数均无明显影响。

b. 温度和约束条件对MgO混凝土力学性能的影响较大。当温度从20℃升至40℃时,MgO混凝土的拉、压强度一般可提高15%和20%;温度对约束强度的影响更大,一般抗压强度可提高30%至36%,抗拉强度可提高26%。约束混凝土拉、压强度的增长率为非约束混凝土的1.6倍和1.7倍。工程中的MgO混凝土均受到约束和水化温升的共同作用,因此其各项力学性能肯定会有比较大的提高。

c. 外掺MgO微膨胀混凝土的各项长期耐久性性能均优于普通混凝土。外掺MgO混凝土的抗冻和抗渗性能有较大提高,其约束抗渗能力可提高数倍;抗冲磨强度一般可提高7%左右。外掺MgO能使粉煤灰混凝土碳化减慢,降低碳化深度34.3%,能较大地提高粉煤灰混凝土的抗碳化能力。掺MgO对混凝土的抗侵蚀性能的影响不大,在约束条件下,甚至会有所提高。实践表明,掺粉煤灰同时掺硅粉和MgO是提高混凝土耐久性能的又一条新途径。

长达20a的混凝土自生体积变形观测和12a龄期的力学与变形性能试验结果表明:MgO混凝土的自生体积膨胀变形是稳定的,它既不会产生无限膨胀,又不会出现回缩现象,其长期膨胀变形能总是趋于稳定的。MgO混凝土长龄期的力学性质是安定的,微膨胀对混凝土长期力学性能的影响不大。10a的长期观测表明,外掺轻烧MgO混凝土的自生体积膨胀变形是很稳定的,不会产生二次性膨胀,其膨胀变形过程线也是比较理想的。

## 参考文献:

- [1] 李承木. 外掺氧化镁混凝土基本力学与长期耐久性能[J]. 水电工程研究, 1999(1): 11~13.
- [2] 李承木. 外掺氧化镁混凝土的性能[A]. 见: 丁宝英. 大体积混凝土结构的温度应力与温度控制论文集[C]. 北京: 兵器工业出版社, 1991.
- [3] 李承木. 氧化镁微膨胀混凝土力学性能的试验研究[J]. 水电工程研究, 1990(1): 8~11.

(收稿日期: 2000-01-03 编辑: 熊水斌)