

# 三峡工程大坝混凝土施工新技术

周厚贵

(中国葛洲坝集团公司,湖北宜昌 443002)

**摘要:**介绍在三峡工程混凝土施工中根据工程需要采取的引进、吸收再创新和自主创新的方法实施的许多新技术,如混凝土建筑原材料、水平及垂直输送技术、模板技术、钢筋连接技术、温控防裂技术等,这些新技术的应用均获得了提高质量、加快进度等综合效益,也是近年来水利水电行业混凝土施工技术的典型成果,可为今后我国大中型水电工程混凝土施工提供借鉴。

**关键词:**混凝土施工;技术创新;三峡大坝;水工建筑物

**中图分类号:**TV52      **文献标识码:**B      **文章编号:**1006-7647(2008)02-0042-05

**New technology of concrete construction in Three Gorges Project//ZHOU Hou-gui** (China Gezhouba Group Corporation, Yichang 443002, China)

**Abstract:** New domestically developed technologies as well as some advanced technologies obtained from foreign countries and then enhanced by further innovation have been used in the concrete construction of the Three Gorges Project. Comprehensive benefits have been achieved by application of these new technologies, including new raw materials for concrete construction, horizontal and vertical transportation, newly developed formwork, steel reinforcement connection, the anti-cracking and temperature control method, etc. These new technologies are typical productions of concrete construction in water resources and hydropower industries in recent years and they will provide some experiences for concrete construction of large and middle-scale hydroprojects in future.

**Key words:** concrete construction; technological innovation; Three Gorges Project; hydraulic structure

三峡工程混凝土浇筑总量为 2794 万 m<sup>3</sup>。工程由拦河大坝及泄水建筑物、电站厂房、通航建筑物等 3 大部分组成。大坝设计为混凝土重力坝,坝顶高程 185 m,最大坝高 181 m,坝顶宽度 40 m,基础最大宽度 134 m,坝顶全长 2309.47 m。其中泄洪坝段位于河床中部,前沿总长 483 m,设有 23 个深孔和 22 个表孔,厂房坝段位于泄洪坝两侧,电站进水口底高程为 108.5 m。电站系坝后式厂房,共安装 32 台机组,单机装机容量均为 700 MW。总装机容量为 22400 MW,年发电 847 亿 kW·h。通航建筑物由 1 座双线五级永久船闸和 1 座垂直升船机组成。

在三峡工程大坝混凝土施工中,在原材料优选、配合比优化、人工砂石骨料高强度生产、大坝混凝土快速施工技术及工艺、大体积混凝土温控防裂、混凝土生产运输浇筑“一条龙”综合监控技术等方面取得了一系列技术创新成果,为提高工程质量、加快工程进度等发挥了巨大的作用。同时上述成果在龙滩、小湾、溪洛渡、向家坝、景洪等大型水利水电工程中得到推广应用,将我国的混凝土坝施工技术推向了一个新的高度。

## 1 混凝土施工新技术

### 1.1 广泛使用散装水泥

在三峡工程混凝土施工中,优先使用了散装水泥。散装水泥的运输采用标准化的专用集装罐,车船装卸都非常便利。散装水泥的全面大量使用,为方便施工、降低成本、改善环境、满足大规模和高强度的大坝混凝土施工需要提供了成熟而可靠的技术保证。

### 1.2 混凝土中添加掺合料

三峡大坝施工将掺合料作为混凝土中不可缺少的第 5 组分,在大坝混凝土配合比中广泛采用了粉煤灰。为提高混凝土质量,所选用的粉煤灰均为需水量比小于 91% 的 I 级优质灰。此外,还根据工程结构的需要添加了硅粉、各类纤维等和使用矿渣型水泥等,这些掺和料的添加,不仅降低了水化热、抑制碱骨料反应,而且可以节约水泥、降低费用。

### 1.3 混凝土中必掺外加剂

三峡工程从优选混凝土原材料入手,在施工全过程中通过进行大量的试验研究及优化,广泛选取

应用了一大批混凝土外加剂,包括第2代萘系高效缓凝减水剂 JG3 和 ZB-1A、第3代聚羧酸类高效缓凝减水剂 X404、泵送剂 JM-II 及引气剂 DH9 等,取得了减少大坝混凝土水泥用量、降低水化热、改善和易性、保障强度正常增长、提高耐久性性能等综合效果。工程实践证明,在混凝土中掺入外加剂后,不仅能够改善混凝土的和易性、调整凝结时间,而且能够提高各项物理力学性能和耐久性、增强混凝土适应环境的能力,经济效益显著。

#### 1.4 混凝土运输采用计算机综合监控

在三峡工程混凝土生产、输送和浇筑过程中,成功采用了计算机综合监控新技术<sup>[1]</sup>。该计算机监控系统由葛洲坝集团与西安交通大学联合研制开发,分为位于大坝下游高程 79 m 的监控系统和位于大坝上游高程 90 m 的监控系统,2 个系统各自独立、功能一致,指挥中心接收高程 79 m 和高程 90 m 监控系统传送来的信号,进行总体协调和监控。该系统的运行保证了三峡二期工程大坝混凝土施工的顺利实施,提高了施工管理水平和工程施工质量,实现了工程建设优质、高效、低耗的目标。

在多品种混凝土同时高强度运输的情形下,需要对其正确识别。传统的方法是在车辆的前部显著位置设置标志,这种方法容易出错且效率低下。三峡工程成功应用了计算机条码识别系统,在右岸 85 m 高程系统混凝土生产、运输中,利用条码识别近 10 万车次,差错率小于 5/10 000。整个识别过程大约在 1 s 左右就能自动完成,通过该系统实现了拌和群楼的集中控制,增加了拌和楼群的综合生产能力,同时还避免了错料等质量事故发生,提高了混凝土的运输效率和可靠性,取得了显著的综合效益。

#### 1.5 混凝土水平和垂直运输一体化

皮带输送机以连续运输为特征,具有较高的生产效率。塔吊式皮带输送机(顶带机)将混凝土水平运输和垂直运输合二为一,使混凝土运输方式发生了重大变革。塔吊式皮带输送机具有浇筑连续、生产率高、可实现混凝土浇筑工厂化生产的特点。在二期工程大坝混凝土浇筑中,共布置 4 台塔吊式皮带输送机、2 台顶带机,单台设计生产能力为 300 m<sup>3</sup>/h,由于三峡大坝仓面混凝土分区复杂,钢筋较多,实际平均生产率为 150 m<sup>3</sup>/h 左右,高峰时达到 200 m<sup>3</sup>/h 以上,特别是通过试验成功创立了塔吊式皮带输送机浇筑四级配和 1 个仓号多品种混凝土同时浇筑工法,解决了运输过程中的骨料分离、砂浆损失、卡料、温度回升以及运行可靠性等技术问题,为实现大坝混凝土优质、快速施工发挥了关键性作用<sup>[2-3]</sup>。

#### 1.6 特殊部位的混凝土垂直运输

在永久船闸竖井和引水压力管道背管等落差大且场地狭小部位的混凝土垂直输送中,采用了具有二次搅拌功能的垂直连续式运输设备 MY BOX。该设备为日本前田公司的专利产品,混凝土料在 MY BOX 内自上而下自由下落,每经过一节就会增加 2 倍次的混合,经过  $n$  节,即增加  $2n$  倍次的混合。它不需要外部能源或动力,能有效避免混凝土垂直运输中发生的骨料离析现象,使用方便。利用 MY BOX 共浇筑混凝土近 30 万 m<sup>3</sup>,既解决了场地干扰的矛盾,又保证了浇筑质量,缩短了工期。与常规的吊罐或泵送混凝土垂直运输方式相比,不仅降低了劳动强度,而且节约运输成本 40%。

#### 1.7 新型模板技术

快速立模是水工混凝土快速施工的重要一环。三峡工程大坝混凝土施工根据不同部位的特点选取了相应的模板。在大坝坝体上下游面、坝体内部纵横缝及大部分泄水孔表面均采用多卡模板,这是一种三角形背支撑结构的大型悬臂模板,具有零配件标准化、组装、运输方便快捷,采用仓面吊进行立模、拆模速度快等优点,同时还把多卡模板支撑系统与三夹装饰板、木胶合板、竹胶面板、保丽板、芬兰板等结合应用于进水口曲面、泄水孔表面和拦污栅表面等特殊部位。在竖井、孔洞等部位使用自主设计制造的整体提升模板、异型大模板、定型模板等。在过流面混凝土浇筑中使用自主研发的专利产品“混凝土桥式振动抹平机”。先进的模板技术不仅提高了工效、降低了工人的劳动强度、改善了作业环境,而且还保证了混凝土浇筑的外观质量。

#### 1.8 钢筋机械连接技术

三峡工程钢筋制造安装工程量达 46.30 万 t,涉及各类品种和各种型号。为了加快施工进度,在施工中广泛采用了钢筋机械连接技术<sup>[4]</sup>。该连接技术主要包括挤压套筒接头、锥螺纹套筒接头、直螺纹套筒接头、熔融金属充填套筒接头、受压钢筋端平面接头等。中国葛洲坝集团公司在工程施工中分别使用了冷挤压、热墩粗、等强度滚轧直螺纹等机械连接技术,此项技术的采用大幅度地提高了现场工作效率、降低了工人劳动强度、改善了劳动环境、提高了钢筋连接质量。

#### 1.9 仓面作业“五小机”

平仓机、振捣机、高压水冲毛机、仓面吊及喷雾机被称为仓面作业“五小机”,它们是随着混凝土浇筑运输入仓技术的发展应运而生的。

在大仓位混凝土浇筑中,平仓采用了专用平仓机,主振捣设备已采用带有多个振捣棒头的振捣机,

这对加快浇筑进度、保障浇筑质量起到了积极的保障作用。

高压水冲毛是一项高效、经济而又能保证质量的缝面处理技术,采用冲毛机冲毛时,其冲毛压力为20~50 MPa,冲毛时机以收仓后24~36 h为宜,冲毛延时以0.75~1.25 min/m<sup>2</sup>效果最佳。

仓面吊主要用于辅助仓内模板、钢筋安装等工作,最大吊高9 m,最大吊重5 t,其体积小、自重轻、运转灵活,可适应于全仓位作业。

仓面喷雾机是在浇筑仓面上空形成一道雾化屏障,以隔离仓外气温进而形成仓面小气候的温控设施。在夏季混凝土浇筑中,采用仓面喷雾的仓位,其仓内小气候温度要比仓外气温降低4~6℃,温控效果显著。

## 1.10 温控防裂技术及工艺

### 1.10.1 不断优化混凝土配合比

自大坝混凝土开仓浇筑以来,先后经过试验和优化调整提出了6期施工用混凝土配合比,施工中主要使用中热水泥和萘系高效减水剂。2005年12月,为便于混凝土生产调配和施工管理,三期大坝施工采用了统一的配合比。

在此基础上,针对最易发生裂缝的高标号混凝土相应地采取了提高粉煤灰用量、优化外加剂掺量、使用低热水泥和聚羧酸类高效减水剂等措施。

a. 优化高标号混凝土中的外加剂掺量。大坝进水口周围R<sub>90</sub>300F250W10高标号混凝土由于水泥用量较大出现了初期温升过快的现象,给温控带来不利影响。为解决这一问题,经过试验,将缓凝减水剂掺量由0.6%提高到0.7%。调整后的R<sub>90</sub>300F250W10混凝土各项指标均满足设计要求,每立方米混凝土胶凝材料比调整前少用了18 kg。

b. 在大体积混凝土中应用低热水泥和聚羧酸类减水剂。钢管坝段管槽外包混凝土需在高温季节浇筑R<sub>28</sub>250泵送混凝土,若使用中热水泥和萘系减水剂,水泥用量将达到273 kg/m<sup>3</sup>,混凝土最高温度将超过设计标准,为此,使用了低热水泥和新一代聚羧酸类减水剂。

根据绝热温升试验,低热水泥混凝土前10 d温度比中热水泥混凝土要低2~3℃,14 d后中热水泥混凝土温度才基本持平。这对控制混凝土最高温度,防止产生温度裂缝是有利的。而羧酸类混凝土超塑化剂,具有高减水、高保坍、高增强等功能,特别适合配制高耐久、高流态、高保坍、高强度以及对外观质量要求高的混凝土,在三期大坝R<sub>28</sub>250F250W10泵送混凝土中应用后,水泥用量由273 kg减少到了241 kg,对混凝土温控防裂起到了重要作用。

### 1.10.2 严格控制拌和楼混凝土出机口温度

三峡大坝混凝土温控要求高,主体建筑物基础约束区混凝土除冬季12月至翌年2月采用自然入仓外,其他季节出机口温度均不超过7℃,脱离约束区混凝土除11月至翌年3月采用自然入仓外,其他季节塔吊式皮带运输机浇筑时出机口温度均要求控制在7~9℃范围内。

为了严格控制出机口温度,在混凝土生产中采用了二次风冷骨料、加片冰及加冷水拌和混凝土的施工工艺。骨料经过二次风冷,特大石、大石和中石的内部温度达到-1.5~-3℃,小石表面温度达到6~8℃,同时控制水泥进罐温度在60℃以内。混凝土拌和中的片冰和冷水掺量根据二次风冷后骨料的温度和砂子含水率来确定,加冰量一般为30~60 kg/m<sup>3</sup>。采用了上述措施后,高程150 m拌和系统的混凝土出机口温度合格率达99.6%,整个系统的总合格率达到98.2%。

### 1.10.3 强化混凝土运输过程中的保温和降温

a. 供料线沿程保温、降温。使用塔吊式皮带运输机浇筑时,混凝土直接从拌和楼经供料线运输入仓。由于工程大坝混凝土浇筑供料线最长达1000余 m,为减少预冷混凝土在运输途中的热量倒灌,采用了封闭上部皮带进行保温和对下部皮带背面冲水进行降温的措施。具体方法是:①在供料线棚顶粘贴聚乙烯苯板,并在供料皮带上方两侧增设橡皮裙边以达到封闭上部皮带、隔热保温目的;②在开仓前15 min,用4℃制冷水冲洗皮带,然后空转皮带,在下部皮带反面冲水以降低皮带温度,并在供料过程中保持料流的连续、不间断。采取上述措施后,可使供料线上的混凝土温度回升减少2℃以上。

b. 仓面降温。仓面降温是通过仓面两侧布置的喷雾管喷雾,在浇筑仓面上方形成一定厚度的雾层,阻挡阳光直射,达到降低浇筑部位上方环境温度的目的。为增强喷雾效果,将仓面每侧喷雾管分为2段,将雾化器装在管路中间,通过阀门控制只在浇筑仓面上方喷雾。每次开仓前先进行风、水流量比例及喷射压力试验,以达到最佳喷雾效果。通过喷雾,仓面小环境温度比气温低5~6℃。

c. 仓面保温。开仓前,应配备不少于2/3~3/4仓面面积的保温被,浇筑坯层振捣完毕后立即覆盖保温被保温。隔热被是在1.0 m×2.0 m的高发泡聚乙烯塑料卷材外加套1层帆布,帆布套表面涂刷一层防水、防酸、防腐胶水,以便冲洗、耐用并兼做防雨布。实践表明,对面积较大的无钢筋或少钢筋坝块,仅在实施大面积或全仓隔热保温单项措施的情况下即可保证浇筑温度不超温。

### 1.10.4 持续改进混凝土浇筑的操作工艺

针对混凝土浇筑每一道工序的特点和重要性,大坝混凝土施工中进行了全过程持续不断的工艺改进和创新。

采用供料线和塔吊式皮带运输机连续输送混凝土并布料到仓面,浇筑方式绝大部分为平层浇筑法。塔吊式皮带运输机下料口距下落面的高度在1.5 m以内,布料方式采用鱼鳞状均匀搭接布料,仓面堆料高度控制在1 m以内;卸料点距模板或钢筋1~1.5 m范围内,经人工处理后再用平仓振捣机或振捣棒及时平仓振捣;在施工层面采用二级配或三级配富浆混凝土形成浇筑软垫层并辅以人工分散骨料等措施。

混凝土下料后,采取先平仓、后振捣,平仓与振捣分开的方法,避免欠振、漏振和过振。混凝土平仓采用平仓机作业。

振捣在平仓之后进行,振捣作业的路线保持一致,以防漏振和过振,并注意不能触及钢筋、模板及预埋件。振捣机振捣头距模板间距至少1.5 m。

在浇筑仓位四周的混凝土时,由于在振捣后骨料受自重作用逐渐下沉,水分和气泡上升,导致砂浆与石子和钢筋的下表面脱离,形成微细裂缝,拆模后易形成表面气泡孔,对此,采取二次振捣等措施效果良好。

为了在混凝土浇筑中防止“三振”,中国葛洲坝集团公司自主研发了平仓振捣机计时报警器,该报警器使振捣作业实现了量化振捣时间、监控振捣深度和统计仓位操作数据的自动化,提高了混凝土浇筑的质量和施工精细化水平。

## 1.11 混凝土养护技术

### 1.11.1 养护

三峡工程施工中,将混凝土养护看作是一个单项工程,相应实施了长期不间断的养护措施。在浇筑中,仓面养护一直进行到上一层面浇筑为止,永久外露面的养护期远大于规范要求的养护期。在夏季,浇筑仓面采用旋转喷头自动洒水养护,每台洒水器通水流量为12~15 L/min,对于洒水器洒不到的部位辅以人工洒水养护,而上下游面、纵横缝则采用 $\varnothing 25$  mm的塑料管,每隔20~30 cm钻 $\varnothing 1$  mm左右的小孔后,挂在模板或外露拉条上进行流水养护。在冬季,浇筑仓面用保温被覆盖后全部采用洒水养护,始终保持混凝土表面湿润。

### 1.11.2 通水冷却

对混凝土实行“个性化通水冷却”,即根据不同标号混凝土的温度变化规律控制冷却水管布设间、排距,依据通水时进、出水的温度动态控制通水流

量,提高通水质量和通水效率。

冷却水管在仓面上一般按 $1.5\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 或 $2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 布置, $R_{28} 250$ 混凝土及以上高标号混凝土仓位中冷却水管布置加密到 $1.5\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 或 $1.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。使用 $\varnothing 25$  mm的黑铁管作为冷却水管,若3 m升层布置两层水管,第2层可用塑料管。冷却水管埋设完后画出布置图并对每组水管编号,注明冷却范围,并在进出水口做好标记,为“个性化通水冷却”提供依据。

冷却通水分为初、中、后3期。初期通水主要是削减混凝土初期温峰,降低大体积混凝土内部的最高温度,使其控制在设计允许范围内,通过10 d左右的初期通水,混凝土温度一般降至 $24 \sim 28\text{ }^\circ\text{C}$ ;中期通水是降低混凝土内部温度的过程,混凝土温度一般降至 $20 \sim 22\text{ }^\circ\text{C}$ ,减少冬季混凝土内外温差,使混凝土顺利过冬;后期通水是对需进行接缝、接触灌浆的部位进行冷却,使之达到灌浆温度( $14 \sim 17\text{ }^\circ\text{C}$ )。

### 1.11.3 保温

三峡工程区具有季节变化显著、昼夜温差大、气温骤降频繁等气候特点,冬季最低气温达 $-1.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,夏季最高气温达 $39.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,每年有8~10次的气温骤降现象。在这样的气候条件下,冬、春、秋三季必须加强混凝土保温。

对于防渗层和长间歇面使用3 cm聚乙烯塑料厚保温被,其他部位或临时保温部位采用2 cm厚的保温被;对于上、下游永久外露面保温采用聚苯乙烯板粘贴后外刷防水涂料;对于进水孔周边由于体型不规则,保温被和聚苯板均很难贴紧混凝土面,难以保证保温效果,故采用喷涂2 cm厚的聚氨酯硬质泡沫进行保温,对于进水孔进出口等孔口部位采用帆布封闭以阻挡“穿堂风”。

用于上、下游永久外露面保温的聚苯板保温材料由黏结剂、聚苯板、防水涂料组成。聚苯板主要理化性能指标如下:表观密度大于 $20\text{ kg/m}^3$ ,尺寸变化率小于5%,吸水率小于或等于4%,抗压强度大于或等于 $0.10\text{ MPa}$ ,导热系数为 $0.034\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,水蒸气透湿系数小于或等于 $4.5\text{ ng/(Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s)}$ 。

现场试验表明:气温在 $14.0 \sim 35.0\text{ }^\circ\text{C}$ 范围变化、温度最大变幅为 $21.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,2 h气温变化最大值为 $6.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,而聚苯板内部温度在 $23.8 \sim 24.4\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,温度变幅为 $0.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,连续2个测点的温度变化最大为 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。5 cm厚聚苯板内部基本上保持相对恒温、恒湿。

用于进水孔周边等部位保温的聚氨酯硬质泡沫保温材料由主料与辅助材料组合而成,包括发泡剂、催化剂、稳定剂、阻燃剂。由于水对聚醚型氨基基本

上没有溶解、腐蚀作用,与泡沫不起反应,所以泡水后不易脱落。其主要理化性能指标如下:内部密度为 $29 \sim 60 \text{ kg/m}^3$ ,表层密度为 $35 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ ,尺寸稳定性小于 $2.0\%$ ,吸水率小于 $150 \text{ g/m}^2$ ,抗压强度大于 $0.17 \text{ MPa}$ ,导热系数为 $(0.019 \pm 0.003) \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$ ,耐燃性(离火自熄时间)小于 $3 \text{ s}$ 。

每年9月底开始对大坝进行全面保温,上游面高程 $98 \text{ m}$ 以下粘贴 $5 \text{ cm}$ 厚聚苯乙烯板,高程 $98 \text{ m}$ 以上粘贴 $3 \text{ cm}$ 厚聚苯乙烯板跟进保温;大坝下游面粘贴 $3 \text{ cm}$ 厚聚苯乙烯板跟进保温。

由于采取了上述一系列温控防裂措施<sup>[5-6]</sup>,葛洲坝集团承建的三峡三期大坝3-1B标段自2003年7月开始浇筑首仓混凝土到2006年4月大坝全线到顶,共浇筑混凝土270余万 $\text{m}^3$ 。在连续3年的联合检查中,大坝混凝土未发现一条裂缝,创造了大坝混凝土工程质量的奇迹。

## 2 结 语

在三峡工程的大坝混凝土施工中,根据工程各阶段进展和质量等需要采取引进、吸收再创新和自主创新的方法实施了许多新的技术,这些新技术

的应用,一方面,直接转化成为先进的生产力,加快了施工进度,提高了施工质量,产生了巨大的综合经济效益;另一方面,使我国的水工混凝土施工技术和水平得到了大幅度的提高,进入了世界领先地位。随着我国水利水电建设事业的进一步推进,上述各项新技术将会得到更加广泛的推行和应用,取得更大的效益。

## 参考文献:

- [1]周厚贵.三峡工程混凝土生产输送综合监控系统的研发与应用[J].系统工程应用研究,2002(1):14-19.
- [2]戴会超,周厚贵.三峡工程大坝混凝土快速施工方案及工艺研究[J].中国三峡建设,2002(7):10-12.
- [3]周厚贵,曾明.三峡二期工程大坝混凝土塔带机入仓快速施工技术[J].水利水电科技进展,2004,24(6):24-26.
- [4]曹西高,钱继源.钢筋机械连接技术及其在三峡工程中的应用[J].中国三峡建设,2001(9):32-34.
- [5]周厚贵.三峡二期工程大坝混凝土施工温度控制的综合技术[J].湖北水力发电,2002(4):22-25.
- [6]周厚贵.三峡工程三期大坝混凝土防裂措施[J].湖北水力发电,2006(3):55-57,2006(4):41-43.

(收稿日期:2007-05-30 编辑:高建群)

(上接第41页)

看出,掺40%的磷渣时,其活性集料的砂浆膨胀值低于在相同水泥含碱量(不掺磷渣)时非活性集料的砂浆膨胀值。该结果表明在掺40%磷渣时,采用活性集料作为人工骨料应用于实际工程,具有一定的安全性。

综上所述,选用3个指标,从3个不同的方面对掺磷渣抑制ASR的效果进行评估的结果表明:在掺40%磷渣的条件下,磷渣对砂浆膨胀率的抑制率大于75%,其14d的砂浆膨胀率小于0.1%,其各龄期的砂浆膨胀率均低于相同碱含量条件下(不掺磷渣)的非活性集料的砂浆膨胀率。因此,笔者认为掺40%的磷渣能够有效地抑制集料的ASR膨胀。

## 3 结 语

AAR是造成混凝土结构破坏失效的重要原因之一,随着我国重点工程持续大规模地发展,预防AAR破坏,延长工程的寿命已成为人们普遍关注并急需解决的问题。磷渣抑制集料ASR的试验研究结果表明,磷渣可以抑制集料ASR的膨胀变形,其抑制效果随着磷渣掺量的增加而增强;与粉煤灰相比,在同等条件下,磷渣抑制集料ASR的效果要逊

于粉煤灰;复掺粉煤灰可以提高磷渣抑制集料ASR膨胀的能力。

采用掺磷渣的膨胀抑制率、砂浆14d膨胀限定值以及低于非活性集料砂浆膨胀值等3个指标,从磷渣所具有的抑制ASR的能力、抑制ASR膨胀的程度以及抑制ASR膨胀的工程安全性这3个方面对掺磷渣抑制集料ASR膨胀的有效性进行评估的结果表明,掺40%的磷渣可以有效地抑制集料的ASR膨胀。

## 参考文献:

- [1]唐明述,邓敏.碱集料反应研究的新进展[C]//姚燕.新型高性能混凝土耐久性的研究与工程应用.北京:中国建材工业出版社,2004:1-7.
- [2]卢都友,许仲梓,吕忆农,等.碱硅酸反应(ASR)抑制措施研究评述[C]//王伶俐,姚燕.重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用.北京:中国建材工业出版社,2000:9-15.
- [3]吴定燕,曾力,方坤河,等.磷渣掺和料在混凝土中的应用[J].云南水力发电,2000,16(2):50-52.
- [4]李光伟,周麒雯.粉煤灰抑制集料ASR有效性的评估[J].水力发电,2007,33(5):34-37.

(收稿日期:2007-03-29 编辑:高建群)