

# 多种并行温控防裂举措在高寒地区 RCC 坝工建设中的应用

朱宝荣, 杨新

中国水利水电第十六工程局有限公司, 福建 福州 350003

**摘 要 :** 北疆某高寒地区 I 等大 (1) 型枢纽工程碾压混凝土重力坝, 碾压混凝土工程量为 240 万  $m^3$ , 要防止或减少因混凝土温度控制不严谨而导致各类混凝土裂缝的产生, 就是要做好碾压混凝土重力坝基础温差、坝体内外温差、上下分层温差以及相邻先浇后浇块温差控制以及冷却水管温差标准值调整等各类温控举措, 本文主要从配合比优化、浇筑层温度控制、高低温期温控防裂控制、坝体内部埋设水管通冷却水控制坝内升温以及做好越冬层面防护措施等方面, 分析总结了一套多种并行温控举措在提高大体积碾压混凝土温控防裂措施的有效应用, 显著提升大体积水工建筑物建设品质。

**关键词 :** RCC 重力坝; 温度裂缝; 配合比优化; 约束区降温; 坝内降温; 越冬保温

## Application of Multiple Parallel Temperature Control and Crack Prevention Measures in RCC Dam Construction in Cold Regions

Zhu Baorong, Yang Xin

China Water Resources and Hydropower 16th Engineering Bureau Co., Ltd. Fuzhou, Fujian 350003

**Abstract :** In a high-altitude area of northern Xinjiang, a Class I large (1) type hub project, the roller compacted concrete gravity dam, has a volume of 2.4 million cubic meters of roller compacted concrete. To prevent or reduce the occurrence of various concrete cracks caused by lax temperature control of the concrete, it is necessary to do a good job in temperature control measures such as temperature difference between the foundation of the roller compacted concrete dam, temperature difference inside and outside the dam body, temperature difference between upper and lower layers, temperature difference control between adjacent first poured and then poured blocks, and adjustment of temperature difference standards for cooling water pipes. This article mainly analyzes and summarizes the effective application of multiple parallel temperature control measures in improving the temperature control and crack prevention measures of large volume roller compacted concrete from the aspects of mix proportion optimization, pouring layer temperature control, temperature control during high and low temperature periods, temperature control and crack prevention control during high and low temperature periods, buried water pipes in the dam body. The, Significantly improve the construction quality of large volume hydraulic structures.

**Keywords :** RCC gravity dam; temperature cracks; optimization of mix proportion; cooling of restricted zone; cooling inside the dam; winter insulation

### 一、概述

北疆某高寒地区 I 等大 (1) 型工程碾压混凝土重力坝, 工程所在地纬度高, 受周边盆地及沙漠区影响, 水文气象特征为: 季风期长, 风向 WNW, 多年平均风速 1.8m/s, 最大风速 25m/s、气候干燥, 昼夜温差大, 气温年差悬殊, 夏季极端最高温度为 40.1℃, 冬季极端最低温度为 -49.8℃, 最大冻土深度为 1.75m。

工程最大坝高 121.5m, 轴线长度 1570m, 设计烈度为 8 度, 基岩动峰值加速度为 206.7gal, 坝体为全断面碾压混凝土结构, 坝体上游坡面由直立面和 1:0.15 斜坡面组成, 下游坡面 1:0.75, 主河床坝段永久横缝间距按照 15m 进行分隔, 左右岸坝肩阶地永久横缝间距按照 20m 进行分隔, 坝体碾压混凝土工程量为 210 万  $m^3$ , 为降低工程造价, 坝体采用“金包银”结构形式, 坝体上下游面水位变化区采用二级配碾压混凝土

(R<sub>180</sub>200W10F300) 作为防冻防渗结构, 坝体内部采用三级配碾压混凝土 (R<sub>180</sub>150W4F200), 为减少或降低大体积碾压混凝土温度裂缝, 在施工中采取优化配合比降低水化热、混凝土拌制和运输中进行预冷、坝内通冷却水等多种措施, 有效降低坝体内部温度上升、降低与外界环境温度差距, 预防和减少混凝土温度裂缝的产生, 为碾压混凝土快速升层起到积极有效的作用。

### 二、优化混凝土施工配合比

大体积碾压混凝土配合比要求在保证混凝土强度及 VC 值的前提下, 尽可能提高矿物及粗、细集料的掺量, 同时降低混凝土单位水泥掺量, 减少水灰比, 降低水泥总发热量, 降低成品混凝土体积收缩比, 预防和减少温度裂缝的产生, 本工程在混凝土中大量掺加粉煤灰, 同时为保证混凝土和易性满足施工需求, 在碾压

作者简介:

朱宝荣 (1982.04—), 男, 汉族, 陕西西安人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 工程建设项目管理 (安全、质量、经营、进度等相关)、抽水蓄能等新能源规划、施工、管理等;  
杨新 (1983—), 女, 河南南阳人, 工程师, 研究方向: 水利工程建设。

混凝土原材料中掺入石粉，在保证混凝土强度的前提下，减少水泥用量，降低混凝土总发热量。

表1 碾压混凝土原材料选择

序号	材料名称	材料特征
1	水泥	“天山牌”P·O42.5普通硅酸盐水泥
2	粉煤灰	玛纳斯电厂I级粉煤灰
3	粗骨料	片麻花岗岩碎石分档料，粒径为5~20mm； 20~40mm；40~80mm
4	细骨料	地产天然砂
5	人工石粉	采用地产粗集料生产的石屑加工而成，粒径小于0.16mm
6	外加剂	新疆五杰化工厂PMS-3缓凝高效减水剂、PMS-NEA3引气剂

针对混凝土升温中最关键的水泥掺量及水化热控制，试验室对P·O42.5普通硅酸盐水泥进行3d和7d水化热检测分析，同时对粉煤灰物力力学性能进行试验检测。

表2 水泥热学性能检测表

材料名称	水化热 (J/g)	
	3d	7d
P·O42.5普通硅酸盐水泥	213.0	271.5

表3 粉煤灰物力力学性能检测表

材料名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	细度 (%)	需水量比 (%)	含水量 (%)	烧失量 (%)	28d强度比 (%)
I级粉煤灰	2.19	7.0	93	0.23	2.75	88.7

根据原材料性能试验成果，优化后碾压混凝土配合比中上、下游二级配RCC (R<sub>180</sub>200W10F300)粉煤灰掺量为84.8kg/m<sup>3</sup>，坝体内部三级配RCC (R<sub>180</sub>150W4F200)粉煤灰掺量为94.3kg/m<sup>3</sup>，同步降低水泥掺量至少至62.9kg/m<sup>3</sup>。

表4 主要碾压混凝土配合比参数表

混凝土	水胶比	材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )							外加剂 (%)		
		水泥	粉煤灰	砂	石粉	小石	中石	大石	水	减水剂	引气剂
R <sub>180</sub> 200 W10 F300	0.45	127.1	84.8	711		534	801	/	95	0.9	0.12
R <sub>180</sub> 150 W4 F200	0.56	62.9	94.3	641	56	439	586	439	88	0.9	0.07

### 三、基础约束区RCC温升控制

设计规定基础允许温差是指在基础约束范围内混凝土允许最高温度与稳定温度之差，参考规范及资料，基础强约束区在0L~0.2L范围内，基础弱约束区在0.2L~0.4L范围内，非约束区在0.4L以上区域，其中L为浇筑块长边长度(m)，按照主河床坝段进行温控计算，基础强约束区RCC允许温度差为12℃，基础弱约束区RCC允许温差为14.5℃<sup>[1]</sup>。

本工程受地理位置和气候条件影响，RCC施工期为每年4月~10月，结合坝体设计允许最高温度计算，RCC在基础强约束区设计允许最高温度为19℃~22℃，在基础弱约束区设计允许最

高温为21.5℃~24.5℃。

表5 碾压混凝土重力坝坝体设计允许最高温度 单位：℃

部位	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
强约束区	19	20.5	22	22	22	20.5	19
弱约束区	21.5	23	24.5	24.5	24.5	23	21.5

### 四、控制浇筑层厚度

根据坝体结构尺寸，上游直立立面采用3m×3m钢模板，下游1:0.75斜坡面采用2张3m×1.875m钢模板进行拼装，按照坝体浇筑仓高度3m进行控制，碾压层厚0.3m，即铺筑10层为1仓，对连续浇筑上升的坝体，且浇筑高度大于0.5L时，允许上下层温差在15℃~18℃。浇筑块侧边长期暴露区域应提高上下层温差要求。

RCC根据气候变化情况控制每一仓间歇时间，高温季节施工按照每升层5~10层间歇3d~7d进行控制，低温季节施工按照每升层10~20层间歇3d~7d进行控制。

### 五、水管冷却对坝内温升的控制

为控制RCC重力坝坝体内部最高温度控制要求，在RCC施工阶段，分坝段按照层高1.5m间距进行埋设，冷却水管按照蛇形方式布置，其中上、下游二级配区域水管转弯半径为0.5m，坝体内部三级配区域水管转弯半径为0.75m，为确保坝内冷却水管循环出水温度满足设计要求，冷却水管不允许接头，单根长度不宜大于250m，进、出水口做好标记，且冷却水管距离坝体上下游边线不得小于2m，进、水管均由大坝下游面或坝体内部廊道引出，禁止由坝体迎水面引水管<sup>[2]</sup>。

初期通冷水时间在RCC浇筑完成后12小时开始通水，流量控制在20~25L/min，控制坝体混凝土降温速度≤1℃/d，间隔12小时变换通水方向，连续通水时间不少于20d，冷水水温与混凝土温度差不应超过22℃。

中期通冷水时间应根据坝内温度测量仪器实际数值进行调整，一般9月份开始对当年5月~8月期间浇筑的混凝土进行通冷水降温，10月份开始对当年4月和9月浇筑的混凝土进行通冷水降温，通水水温与混凝土内部温度差不应大于20℃，流量控制在20~25L/min，通水时间20~30d，并控制混凝土降温速度≤1℃/d。

待坝体内部混凝土温度趋于稳定后，进行冷却水管回填灌浆，并将外露水管进行切除，回填灌浆采用P·O42.5普通硅酸盐水泥，水灰比为0.5:1，灌浆压力为0.3MPa。

### 六、RCC坝体越冬层面保温防护

根据工程所在地地理及气候特征，年极端最高温度40.1℃，极端最低温度为-49.8℃，最大冻土深度为1.75m，为保证混凝土表层在冬季极端低温气候条件下不至遭受冻害，必须做好坝体混凝土越冬保温防护，先在坝体越冬层面铺设一层塑料薄膜(厚度0.6mm)隔离水分，再铺设2层厚度为2cm的聚乙烯保温被覆盖，再在其上铺设13层厚度为2cm的保温棉被，最后采用一层三防帆布进行防风、防雪保护，顶部采用沙袋压盖，为防止越冬层

上、下游及侧面强风破坏,在坝体上、下游将沙袋垒高度1m,宽0.8m的防风墙,并且在越冬层面下部2m范围喷涂厚度10cm的聚氨酯硬质泡沫进行防护。

图1 越冬层面及上下游保温结构图



## 七、RCC重力坝施工过程温度控制和保养

### (一) 混凝土拌和物温度控制

为降低混凝土拌和物出口机口温度,对骨料进行预冷处理,首先增加堆料高度,建设大型成品遮阳料仓,储备连续7d用量,堆料高度大于8m,采用底部输出方式,利用传送皮带将骨料送入风冷料仓,骨料在风冷料仓中等待时间 $\geq 2.5$ 小时,确保充分冷却<sup>[9]</sup>。

水泥、粉煤灰储料罐表层涂刷白色涂料,以反射阳光照射率,减少储料罐吸热量,在储料罐下部锥体采用直径35mm的硬质塑料管进行缠绕,并用保温棉被进行包裹,塑料管内通入循环冷水进行降温。

拌和水降温:修建临时储水池,顶部搭设遮阳棚,水源取自于上游河道内水面以下20m范围以外区域,水温约10~12℃,并利用每年初冰冻期内,储存大量冰块,在6月~8月高温季节投入蓄水池降低水温。

在混凝土拌和过程中,及时做好温度测量,特高温气候条件下,利用制冰厂制造片冰掺入混凝土拌合物中,确保出口机口温度 $\leq 12^\circ\text{C}$ 。

### (二) 混凝土运输过程温度控制

碾压混凝土主要采用自卸汽车进行运输,自卸汽车车厢侧壁采用喷涂聚氨酯材料进行保温,在自卸汽车顶部安装自升式防晒遮阳棚,减少运输过程中的热辐射升温。

### (三) 混凝土入仓浇筑温度控制

(1) 缩短混凝土层间间隔时间,加快仓面覆盖速度,根据拌和、运输及入仓强度分析,结合仓面最大浇筑面积,超过1万 $\text{m}^2$ 的大仓面尽可能采用斜层碾压方式,减少仓面铺料面积,缩短碾压层间间隔时间。

(2) 仓面内部周边布置雾炮机,对仓面进行小气候温、湿度调整,防止混凝土VC值损失。

(3) 仓面布置大面积三防帆布,碾压层施工后及时进行防护覆盖,防止因碾压层表面水分蒸发影响与下一层的衔接,避免出现断层和冷缝。

(4) 施工时尽量避开高温中午阳光直射时段,尽可能利用早、晚和夜间低温时段浇筑混凝土,混凝土施工时段尽量控制在气温 $25^\circ\text{C}$ 以内,超过时应间隔5~8分钟冷水喷雾,使保持仓内湿度达到80%以上,温度在18~ $22^\circ\text{C}$ 之间。

(5) RCC施工完成待终凝后,宜采用薄层流水养护方式削减水化热升温,可采用土工布覆盖面层,在保证土工布湿润的条件下,间隔洒水养护,降低混凝土温升<sup>[4]</sup>。

## 八、质量检查及成果分析

### (一) 钻孔取芯质量检查

本工程2007年越冬期碾压混凝土浇筑至645m高程,经历2007年10月~2008年3月共6个月的越冬期后,2008年4月开展钻孔取芯工作,共取得芯样116.36m,芯样获得率100%。

其中碾压混凝土段,大部分芯样表面光滑、致密,骨料分布均匀,芯样完整性好,约为总量1%的芯样,骨料较集中,芯样完整性较好,碾压混凝土段与基础常态混凝土结合层面良好。

### (二) 压水试验质量检查

根据设计要求在坝体上游二级配区域和坝体内部三级配区域各布置2个直径75mm的压水试验检查孔,压水试验自上而下分段进行,试验段长度为5m,第一试验段压力数值为0.2MPa,第二段、第三段压力数值为0.5MPa。

根据压水试验成果分析,坝体上游二级配区域透水率最大值为0.95Lu,最小值为0.05Lu,平均透水率0.56Lu,属微透水性。坝体内部三级配区域透水率最大值为2.64Lu,最小值为0.38Lu,平均透水率1.45Lu,属微透水性。

### (三) 成果分析

根据钻孔取芯成果揭示,碾压混凝土芯样表面光滑、致密、骨料分布均匀,芯样完整性好,其中总量约1%的芯样较疏松,表面粗糙,骨料较集中,芯样完整性一般。芯样整体外观分析显示,碾压混凝土各层间结合良好,层缝面完好率97.83%。

压水试验成果显示,在大部分孔段,碾压混凝土透水性属微透水,坝内局部孔段为透水。

## 九、结论与建议

根据实例分析,在高寒、高温差地区进行碾压混凝土施工,为降低和减少坝体混凝土温度裂缝的产生,应重点关注混凝土内部水化热升温与坝体表面与外界温差变化。本工程在实践过程中,第一是采用优化混凝土施工配合比减少水泥掺量,以降低混凝土内部水化热升温,从本质上降低了混凝土温度上升;第二是在混凝土拌制和运输过程中采取骨料预冷、冷水拌和、运输保温等方式,从原材料至出口机口乃至施工仓面,有效解决了高温季节混凝土施工过程中混凝土拌和物温度损失和温度控制;第三是利用坝内埋设水管分期通水冷却,在初期有效杜绝了混凝土早期水化热升温产生温度裂缝的可能性,在中期有效缓解了坝内混凝土温度的持续升温,进而降低了坝基强、若约束区与基础围岩的温度差;第四是采取缩短混凝土各施工层间隔时间、喷冷水雾、调整施工时段、加强混凝土保养以及做好越冬期保温防护等措施,减少了碾压混凝土施工阶段外界高温辐射和冷空气的侵袭,保证和提高了工程建设品质。

## 参考文献

[1] 纪云生, 康世荣, 陈东山, 等. 水利水电工程施工组织设计手册. 3. 施工技术, 1987.12.  
 [2] 付元初, 谭靖夷, 周世明, 等. 水利水电施工手册. 混凝土工程. 2002.12.  
 [3] 阮新民, 夏世法, 鲁一晖, 等. 高寒地区RCC重力坝保温措施及效果分析, 南水北调与水利科技, 2009-03.  
 [4] 牛万吉, 张康, 王建平, 严寒干旱地区RCC重力坝保温防裂措施的研究与实践. 新疆水利, 2008.