

沿海高温多雨地区碾压混凝土大坝大体积混凝土温控防裂技术研究

耿立洋

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：大体积混凝土施工中，水化热导致的温度裂缝是影响大坝结构安全性和耐久性的关键问题。本文以福建云霄抽水蓄能电站上水库碾压混凝土重力坝工程为背景，针对其 107.16 万 m^3 的大体积混凝土浇筑任务，系统研究了高温多雨气候条件下的综合温控防裂技术。通过建立热平衡计算模型，分析了原材料温度、配合比、环境温度等因素对混凝土出机口温度的影响，提出了“骨料风冷+片冰+制冷水”的三级预冷工艺，并结合冷却水管通水冷却、仓面喷雾、智能温度监测及表面养护等措施，构建了全流程温控体系。研究表明，该综合技术方案能有效将混凝土出机口温度控制在 21°C 以内，确保坝体最高温度满足设计要求，加快了大坝混凝土浇筑的施工进度，可为类似大型水电工程提供参考。

【关键词】：抽水蓄能电站；碾压混凝土重力坝；大体积混凝土；温度控制；防裂技术；预冷混凝土

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.061

1 引言

随着我国水电能源建设的快速发展，抽水蓄能电站作为电力系统调峰填谷的重要手段，其建设规模不断扩大。碾压混凝土重力坝因其施工速度快、造价低等优点，在抽水蓄能电站建设中得到了广泛应用。然而，大体积混凝土浇筑后，水泥水化热在内部聚集不易散发，导致内部温度升高，而表面散热较快，形成较大的内外温差，从而在混凝土内部产生压应力、表面产生拉应力。当拉应力超过混凝土的抗拉强度时，便会形成温度裂缝，严重影响大坝的结构安全性与长期耐久性。

福建云霄抽水蓄能电站位于福建省云霄县，地处亚热带海洋性季风气候区，具有高温、多雨、日照强的特点。该电站上水库主副坝为碾压混凝土重力坝，混凝土总量达 107.16 万 m^3 ，最大坝高 68.2m。如何在高温季节有效控制大体积混凝土的温度，防止裂缝产生，是本工程施工技术的关键难点。

本文依托该工程实践，针对高温环境下的混凝土温控问题，通过理论计算与工艺创新，研究了一套包括原材料控制、预冷工艺、通水冷却、智能监测在内的综合温控防裂技术体系，并对关键技术参数和施工措施进行了详细阐述。

2 工程概况与温控难点

2.1 工程概况

福建云霄抽水蓄能电站位于福建省云霄县火田镇，总装机容量 1800MW，安装 6 台单机容量 300MW 的可逆式水泵水轮

发电机组。电站枢纽主要包括上水库、下水库、输水系统及厂房系统组成，为 I 等大（1）型工程。

上水库工程主要建筑物包括一座主坝和一座副坝，均为碾压混凝土重力坝。主坝坝顶高程 610.0m，防浪墙顶高程 611.2m，最大坝高 68.2m，坝顶长 1305m；副坝最大坝高 30m，坝顶长 346m。上水库混凝土施工总量约 107.16 万 m^3 ，包括常态混凝土、碾压混凝土和变态混凝土。

2.2 水文气象条件

工程所在区域属亚热带海洋性季风气候，具有以下特征：

（1）气温：多年平均气温 21.1°C ，7 月平均最高 28.6°C ，极端最高气温 39.7°C 。（2）降水：多年平均面降雨量 1725.4mm，雨量充沛。（3）日照：多年平均日照 1869.9h，7 月日照最高 232.5h。（4）风速：多年平均风速 2.5m/s。

高温季节长、日照强烈、气温高的气候特点，给大体积混凝土温控带来严峻挑战。

2.3 温控防裂难点分析

（1）水化热集中：大体积混凝土内部水化热聚集不易散发，导致内部温度急剧升高。（2）内外温差大：表面散热快，内部散热慢，形成较大内外温差。（3）环境温度高：高温季节施工，原材料温度高，混凝土出机口温度难以控制。（4）施工强度高：总混凝土方量大，高温季节仍需持续施工。

3 混凝土温度控制标准

为确保大坝混凝土施工质量,根据设计要求和相关规范,制定了严格的温度控制标准。

3.1 基础温差控制

混凝土基础允许温差根据浇筑块长边尺寸和距基础面高度确定。本工程最高坝段为主坝22#坝段,浇筑块长边长度为56m,其基础允许温差标准如表1所示。

表1 大坝混凝土基础允许温差

距离基础面高度 h	最高坝段(溢流坝段)		高温季节开浇坝段	
	浇筑块长边长度: 56m		浇筑块长边长度: 52m	
	碾压混凝土	常态混凝土	碾压混凝土	常态混凝土
0~0.2L	14	16	14	16
0.2~0.4L	16	18	16	18
>0.4L	19	20	19	20

注: L为浇筑块长边尺寸。

3.2 其他控制标准

(1) 内外温差:控制在18℃以内。(2) 新老混凝土温差:不超过15℃。(3) 混凝土浇筑温度:强约束区≤22℃,弱约束区及非约束区≤25℃。(4) 相邻坝块高差:不大于12m。

4 混凝土温度控制计算

4.1 热平衡计算模型

混凝土出机口温度采用热平衡法计算,基本原理是各组成材料的热含量之和等于拌和后混凝土的总热含量。计算公式为:

$$T_0 = \frac{\sum(W_i \cdot C_i \cdot T_i) + Q_m}{\sum(W_i \cdot C_i)}$$

式中: T_0 为混凝土出机口温度(℃); W_i 为各组分材料重量(kg/m^3); C_i 为各组分材料比热($\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$); T_i 为各组分材料温度(℃); Q_m 为机械热(kcal/m^3)。

4.2 初始温度计算

以C9015W2F50三级配碾压混凝土为例,其配合比为:水泥61 kg/m^3 、粉煤灰91 kg/m^3 、砂759 kg/m^3 、小石412 kg/m^3 、中石553 kg/m^3 、大石418 kg/m^3 、水82 kg/m^3 、外加剂1.748 kg/m^3 。

在不采取任何降温措施的情况下,设定原材料温度(水泥65℃、粉煤灰35℃、骨料24.7℃),计算出机口温度达25.83℃,

超过温控要求(强约束区≤21.5℃),必须采取降温措施。

4.3 预冷工艺设计计算

4.3.1 加冰加冷水方案

采用加冰和制冷水拌和的预冷措施,每方混凝土加冰29kg,使用6℃冷水拌和(冷水系统需将水冷却至4℃,考虑输送温升2℃),计算出机口温度可降至21.48℃,满足强约束区温控要求。

根据全年各月气温变化,计算不同月份所需加冰量和冷水温度,其中有代表性的4个月份加冰和加冷水计算结果详见下表2。

表2 预冷混凝土加冰加冷水参数表(强约束区)

月份	骨料温度(℃)	加冰量(kg/m^3)	冷水水温(℃)	出机口温度(℃)
1月	15.3	0	15.3	17.8
5月	24.7	26.5	6	21.48
7月	28.6	30	6	24.44
8月	28.5	30	6	24.35

计算结果表明,仅靠加冰加冷水措施,在6-10月高温季节,强约束区混凝土出机口温度无法满足≤21.5℃的要求,需要采取更强有力的预冷措施。

4.3.2 骨料风冷方案

为进一步降低出机口温度,增加骨料风冷系统,对大石骨料进行预冷。设定大石骨料风冷至8℃(考虑输送温升2℃,风冷系统需将骨料冷却至6℃),加冰30kg,加6℃冷水,计算出机口温度可降至20.99℃,满足≤21℃的要求。

4.4 预冷系统工艺设计

根据产能需求和温控目标,设计预冷系统如下:(1)冷水系统:配置1套集装箱式冷水机,产冷水量864 $\text{m}^3/24\text{h}$,进水温度23℃,出水温度5℃。(2)制冰系统:配置1套100t/24h集装箱式片冰机。(3)骨料风冷系统:选用集装箱式骨料一次风冷系统,总制冷量不低于660kW,蒸发温度-12℃。

5 综合温控技术措施

5.1 原材料温度控制

(1) 胶凝材料控制:水泥运抵工地温度≤65℃,粉煤灰为自然温度。(2) 骨料控制:砂石骨料加工系统、上料皮带、储料仓全部搭设全封闭罩棚,避免日晒;粗骨料堆放高度≥6m,高温时段在罩棚四周设置喷淋系统降温。(3) 外加剂控制:

储存在专门存储室,避免暴晒和雨淋。

5.2 混凝土拌和温度控制

采用“骨料风冷+片冰+制冷水”三级预冷工艺,通过热平衡计算优化配合参数,确保出机口温度满足设计要求。

5.3 运输过程温控

(1) 运输前用冷水冲洗车厢,保持湿润降温。(2) 拌合站场内沿围挡安装自动喷雾系统,营造低温气候。(3) 运输车辆做好遮阳,缩短运输时间。(4) 加强协调管理,减少等待卸料时间。

5.4 浇筑过程温控

(1) 仓面喷雾降温:在浇筑仓号周边配置移动式喷雾机,喷雾能力 25-60m,布置于大坝上下游侧,高度高于仓面 2-3m,构建仓面小气候。要求雾滴直径 40-80 μm ,避免表面泛浆,可降低周围环境温度 3-6 $^{\circ}\text{C}$ 。(2) 控制浇筑参数:浇筑层高控制在 3m;上下层间歇时间 5-7d;高温时段尽量安排在早晚、夜间及阴天浇筑;自出料到摊铺施工控制在 4h 内完成。(3) 加快施工速度:各环节统一调度,提高运输车辆利用率,缩短运输及等待时间,入仓后及时平仓振捣,最大限度缩短覆盖间歇时间。

5.5 通水冷却措施

(1) 冷却水管布置:采用高密度聚乙烯 HDPE 管,主管内径 32mm、壁厚 4mm,支管内径 28mm、壁厚 2mm。冷却水管水平间距 1.0m,排距 1.5m,距上下游坝面 1.0-1.5m,距横缝面 0.7-1.5m。单根蛇形支管长度 $\leq 200\text{m}$,冷却水流量控制在 1.0-1.5 m^3/h 。

(2) 分期通水冷却:一期通水冷却:采用天然河水,混凝土下料即开始通水,持续 28d。水流方向每 24-48h 变换一次,水温与混凝土温度差 $\leq 22^{\circ}\text{C}$,日降温速度 $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。二期通水冷却:根据温度监测结果决定是否进行,历时 $\geq 30\text{d}$,降温幅度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$,最大降温速率 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

5.6 智能温度监测

采用广联达大体积混凝土测温系统,实现混凝土内部温度

自动化监测。系统集成运算、控制与数据通讯于一体,自动采集混凝土内部温度,通过移动通讯网络无线传输至云平台。

监测内容包括:(1) 出机口温度、入仓温度(每 4h 一次)。(2) 浇筑温度(每浇筑层 4 个测点)。(3) 内部温度(埋设传感器组)。(4) 冷却水进出口温度、流量。

5.7 混凝土养护

养护时间:混凝土终凝后开始养护,不少于 28d

养护方式:上下游面及暴露侧面采用淋水养护;水平仓面采用喷雾和覆盖保水材料;永久暴露面采用长期流水养护

保温措施:冬季及气温骤降时,外露面覆盖等效热交换系数 $\beta \leq 5\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 的保温材料。

6 温控效果分析

通过实施上述综合温控技术措施,现场已达到以下效果:

(1) 出机口温度控制:高温季节(6-9月)混凝土出机口温度可控制在 21-24 $^{\circ}\text{C}$,基本满足温控要求。(2) 最高温度控制:坝体最高温度可控制在 31-38 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,符合设计允许最高温度标准。(3) 内外温差控制:通过通水冷却和表面保温,内外温差可控制在 18 $^{\circ}\text{C}$ 以内。(4) 温度应力控制:有效防止温度裂缝产生,确保大坝结构安全性和耐久性。

7 结论

本文以福建云霄抽水蓄能电站上水库碾压混凝土重力坝为研究对象,针对高温多雨气候条件下的大体积混凝土温控防裂问题,通过理论计算与工艺创新,得出以下结论:

(1) 建立的热平衡计算模型可准确预测混凝土出机口温度,为预冷工艺设计提供理论依据。(2) 采用“骨料风冷+片冰+制冷水”的三级预冷工艺,可有效降低混凝土出机口温度,满足高温季节温控要求。(3) 结合冷却水管通水冷却、仓面喷雾、智能监测和表面养护的综合温控体系,能全方位控制混凝土温度,防止裂缝产生。(4) 该技术方案已在工程中得到应用,为类似大型水电工程的大体积混凝土温控防裂提供了可借鉴的经验。

参考文献:

- [1] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [2] 水工混凝土温度控制施工规范[DL/T 5787-2019].
- [3] 福建云霄抽水蓄能电站上水库土建及金属结构安装工程相关设计施工图纸和技术要求等.
- [4] 水利水电工程施工组织设计手册[M].北京:中国水利水电出版社,2016.