

杨房沟水电站高拱坝大体积混凝土温控措施研究

叶劲松, 刘晓龙, 李雷刚

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:高拱坝大体积混凝土施工过程中的温度控制为其重中之重。为解决大体积混凝土在其硬化过程中水泥水化热在块体内产生的温度变化带来的应变和应力、继而引发的温度裂缝问题,需要采取强有力的施工措施控制混凝土的温度变化。阐述了杨房沟水电站从混凝土原材料、出机口温度、混凝土入仓、浇筑、养护及通水冷却等环节进行的全过程有效控制,使混凝土温控相关的各项指标满足设计要求,控制水平优秀,所取得的经验对同类工程具有推广和借鉴意义。

关键词:高拱坝;大体积混凝土;杨房沟水电站;温度;控制措施;研究

中图分类号:TV7;TV41;TV43;TV523

文献标识码:B

文章编号:1001-2184(2022)04-0010-05

Temperature Control Measures of Mass Concrete in High Arch Dam in Yangfanggou HEP

YE Jinsong, LIU Xiaolong, LI Leigang

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610213)

Abstract: Temperature control of mass concrete during construction is a top priority in high arch dam. In order to meet the challenge of strain and stress caused by the temperature change of cement hydration heat in the mass concrete during its hardening process and the temperature crack caused by it, it is necessary to take strong construction measures to control the temperature change of concrete. This paper elaborates the effective control of the whole process in Yangfanggou hydropower project, from concrete raw materials, outlet temperature, concrete placing, pouring, curing to water cooling, so as to make the relevant indicators of concrete temperature control meet the design requirements, and the control level is excellent. The experience obtained has the significance of promotion and reference for similar projects.

Key words: high arch dam; mass concrete; Yangfanggou Hydropower Project; Temperature; Control measure; study

1 概述

杨房沟水电站拦河坝为混凝土双曲拱坝,坝顶高程为 2 102 m,河床建基面高程为 1 947 m,坝高 155 m。拱冠梁坝顶厚度为 9 m,拱冠梁坝底厚度为 32 m^[1]。拱坝坝顶中心线弧长为 362.17 m,分 16 个横缝,共 17 个坝段。

杨房沟水电站坝址区属典型的川西高原气候区,主要受高空西风环流和西南季风影响,干、湿季节分明。多年平均气温为 16.5℃,极端最高气温为 40.6℃,极端最低气温为 -3.6℃。多年平均地温为 14.7℃,历年最高地温为 21.7℃,历年最低地温为 5.1℃;多年平均水温为 11.2℃,历年最高水温为 17.2℃,历年最低水温为 3.7℃。干季(11月~次年4月)日照强、多大风、湿

度小、昼夜温差大。雨季(5~10月)雨量充沛、湿度较大、气温较高,受极端气候的不利影响,拱坝混凝土温度控制施工的难度非常大。

鉴于杨房沟水电站双曲拱坝属于大体积混凝土建筑物,水泥在水化过程中产生了较高的水化热量,使混凝土的内部温度升高而带来相应的应变和应力,极易产生温度裂缝,进而影响到混凝土的整体结构,因此,需要采取强有力的施工措施控制混凝土的温度变化。介绍了杨房沟水电站高拱坝大体积混凝土采用的温度控制措施。

2 混凝土温度控制标准

2.1 温差控制标准

(1)基础容许温差。杨房沟水电站双曲拱坝混凝土基础容许温差控制标准为:河床坝段强约束区为 17℃,弱约束区为 20℃;岸坡坝段强约束

收稿日期:2022-06-06

区为 16℃,弱约束区为 19℃。

(2)内外温差控制标准为 17℃。

2.2 最高温度控制标准

杨房沟水电站双曲拱坝施工期混凝土最高温度控制标准见表 1。

表 1 混凝土最高温度控制标准表

分区	月 份						
	1	2	3	4~9	10	11	12
基础强约束区 /℃	27	29	29	29	29	29	27
基础弱约束区 /℃	27	29	31	31	31	29	27
自由区 /℃	27	29	32	33	32	29	27

2.3 混凝土出机口温度

对混凝土出机口温度按不超过 11℃控制。高温季节为控制拱坝混凝土的最高温度,混凝土出机口温度按不超过 9℃控制。

2.4 混凝土浇筑温度

拱坝混凝土的浇筑温度按不超过 15℃控制。任何部位的混凝土浇筑温度在任何时段均不能低于 7℃。

2.5 混凝土内部温度的降温速率

对于一期冷却阶段:混凝土日降温速率不超过 1℃,且日平均降温不宜超过 0.5℃;中期冷却阶段的混凝土日降温速率不超过 0.6℃,且日平均降温不宜超过 0.4℃;二期冷却阶段混凝土日降温速率不超过 0.5℃,且日平均降温不宜超过 0.3℃。该工程一期、中期冷却阶段符合率为 90%,二期冷却阶段符合率为 95%。

2.6 混凝土内部温度回弹控制

一期冷却降温阶段与中期冷却降温阶段之间、中期冷却降温阶段与二期冷却降温阶段之间以及二期冷却降温阶段后(接缝灌浆后 1 个月内)\或低温季节若混凝土最高温度与一期冷却目标一致时,混凝土平均温度回升按不超过 1℃控制;当混凝土平均温度回升 0.5℃时,需采用 0.5~0.8 m³/h 小流量通水措施控制混凝土的温度回升,通水水温及历时需根据混凝土温度要求选用,温度回弹控制符合率为 90%。

3 混凝土温度控制措施

3.1 混凝土出机口温度控制

根据相关技术要求,混凝土出机口温度按不超过 11℃控制。高温季节混凝土出机口温度按

不超过 9℃控制。

为了保证混凝土出机口温度满足温控技术要求,根据不同的季节,对不同的骨料粒径采用不同的温度控制标准。2018 年 10 月至 2019 年 4 月 20 日,骨料风冷温度按照监理部批复文件(长杨监辅[2018]170 号)的要求进行控制。冬季骨料温度的控制标准为:白天 9℃、6℃、3℃、3℃(小石、中石、大石、特大石),晚上 7℃、7℃、7℃、7℃(小石、中石、大石、特大石);2019 年 4 月 20 日以后,骨料风冷温度按照监理部批复文件(长杨监辅[2019]37 号)的要求进行控制,低温季(11 月~次年 2 月)按照 9℃、7℃、7℃、7℃(小石、中石、大石、特大石)的标准进行控制;高温季(3~10 月)按照 7℃、6℃、4℃、4℃(小石、中石、大石、特大石)标准进行控制。

为确保混凝土出机口温度,加大了一次、二次骨料风冷质量控制,加大了骨料温度检测频率(大石、特大石温度每 2 h 测温一次),并结合水泥、粉煤灰等原材料的温度检测情况适当调整进风温度,同时加强风冷料仓的料位控制,保证料位高度不低于料仓回风口。根据骨料的实际含水量变化情况及时调整混凝土的用水量和加冰量,确保混凝土出机口温度及坍落度满足要求。

3.2 混凝土浇筑过程控制

(1)加强混凝土运输过程的管理,缩短运输时间,减少转运次数,对运输车车厢采取配备防雨、防晒、隔热装置等措施。

(2)混凝土运输至卸料平台后快速卸入料罐内,通过缆机垂直运输料罐至指定浇筑仓内及时下料。

(3)混凝土浇筑过程中,一旦卸料入仓、现场平仓人员应立即进行平仓振捣,同时加快混凝土层面的覆盖速度和平仓振捣速度,做到不堆料、压料,提高混凝土的浇筑强度,缩短坯层的覆盖时间。

(4)高温季节应避开高温时段浇筑混凝土,充分利用低温季节和早晚及夜间气温低的时段进行浇筑,白天开仓前 2 h 进行喷雾降温。

(5)当仓内气温高于 22℃,需进行仓面喷雾以降低仓内的环境温度。喷雾应覆盖整个仓面,水分不应过量,应防止混凝土表面出现积水现象。

3.3 通水降温控制

杨房沟水电站拱坝混凝土属于大体积混凝土,其表面系数较小,水泥水化热释放较为集中,内部升温比较快,进而造成混凝土内外温差较大,极易产生混凝土温度裂缝,从而影响到拱坝结构的安全和正常使用。因此,需要采取降低混凝土内部最高温度、减少混凝土最高温度与运行期设计温度间的差值,方能够有效预防温度裂缝的产生。通常采取在坝体内埋设冷却水管进行通水降温^[2]的措施,以带走混凝土内部水化热温升,使各

点温度均衡,避免出现过大的温度梯度。

根据拱坝混凝土温控防裂特点,杨房沟水电站将混凝土通水降温过程分为一期冷却、中期冷却、二期冷却进行,在各期通水降温施工过程中,结合智能温控系统自动调节。对各典型浇筑仓从浇筑温度至封拱温度进行全程跟踪监测并建立温度~时间过程线,对其进行反馈复核和分析总结,以指导混凝土温度控制施工。混凝土分期冷却降温过程见图 1。

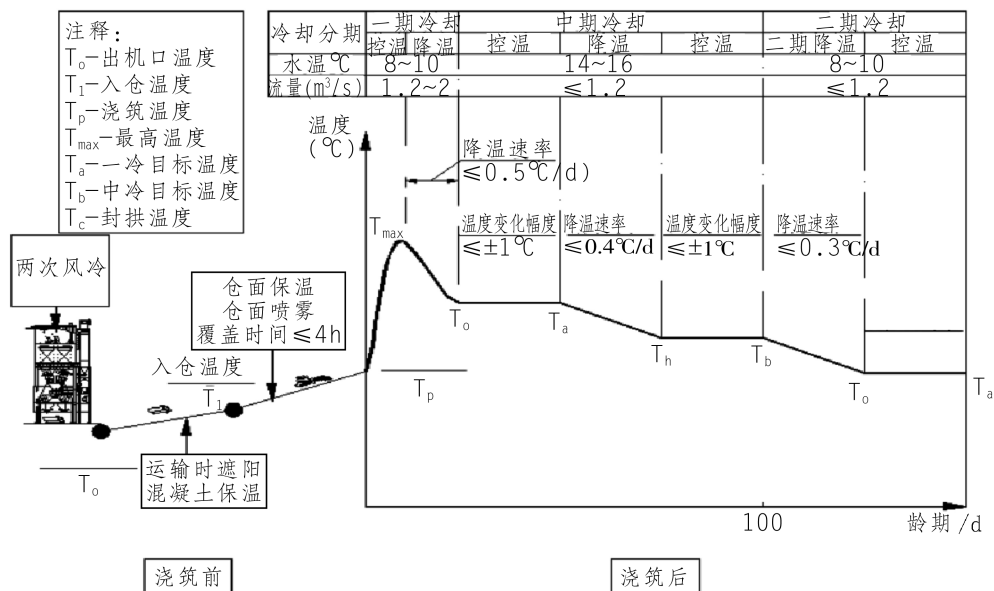


图 1 混凝土分期冷却降温过程示意图

3.3.1 坝体冷却水管的布置

杨房沟水电站拱坝混凝土冷却水管的支管采用蛇形布置,蛇形支管的方向垂直于水流方向布置。冷却水管的主管进出口均布置在坝体下游、集中到坝后桥或临时栈桥部位与流量测控装置连接。考虑到该工程牛腿、孔口等结构部位温度控制难度大,根据对采集到的温度数据进行分析后对混凝土仓内冷却水管的间距布置进行了优化调整:

(1)大坝非孔口坝段冷却水管间距按 1.5 m (竖向)×1.5 m(水平)布置。

(2)廊道周边冷却水管的间距按 1 m(竖向)×1 m(水平)布置。

(3)孔口部位的冷却水管间距按 1 m(竖向)×0.8 m(水平)布置。

3.3.2 通水降温控制

为提高通水冷却的控制精度,对冷却水管的

入口和出口温度同时进行监控,并适时根据出口水温调整通水流量,通水方向每 24 h 更换一次。当预测通水控温难以满足设计要求时,缩短至 12 h 更换一次。对于低温季节浇筑混凝土,当外界气温低于 10 °C 时,由于水温、气温相对较低,采用天然水即可以达到较好的控温效果。但应注意调整通水流量,避免出现混凝土降温速率超标的情况,必要时可暂停通水,避免过度冷却和气温骤降叠加给混凝土带来不利的影响。

在各期降温过程中,应根据温度测量成果及时调整通水流量,确保降温速率满足要求。为保证最高温度控制、防止降温幅度过大过快,应进行各期冷却目标温度预警,即距离冷却目标温度 1 °C~2 °C 时进行预警、预控,加大温度观测频次,根据温度测量成果及时调整通水,防止最高温度超标。各部位各期通水冷却目标温度及降温幅度见表 2。

表2 各部位各期通水冷却目标温度及降温幅度表

/℃

部位	最高温度控制标准	一期冷却		中期冷却		二期冷却	
		降温幅度	目标温度 T_a	降温幅度	目标温度 T_b	降温幅度	目标温度 T_c
基础强约束区和孔口约束区	27~29	6~8	21~22	4~6	16~17	3~6	封拱温度 (12~15)
弱约束区和自由区	27~33	6~9	21~24	4~6	17~18	3~6	

(1) 一期冷却要求。

①一期冷却的主要目的是削减水化热温升,降低混凝土最高温度。混凝土浇筑平仓振捣完成后应尽早开始一期通水冷却,其冷却水管入口处参考的通水温度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,低温季节可视情况调整为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

②一期冷却目标温度为 T_a ,降温幅度控制在 $6\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (基础强约束区和孔口约束区目标温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,弱约束区和自由区目标温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$),日最大降温速率不超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,且日平均降温幅度按不超过于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 控制,冷却降温过程应连续平顺,防止因通水不足及通水中断等原因造成的温度回升。一期通水冷却的时间不少于21 d,自开始通水至混凝土最高温度出现2 d后,通水流量不宜超过 $1.2\sim 2\text{ m}^3/\text{h}$ ^[3],具体可根据现场实际控温情况适度调整。

(2) 中期冷却要求。

①一期冷却达到其目标温度 T_a 后可根据实测混凝土内部温度情况开始中期通水冷却。中期冷却的主要目的是以控温为主,防止一期冷却结束后混凝土温度快速回升进而导致增加后期冷却的降温幅度。中期通水冷却阶段,冷却水管入口处的参考通水温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

②中期冷却目标温度为 T_b ,其降温幅度控制在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (基础强约束区和孔口约束区的目标温度为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$,弱约束区和自由区的目标温度为 $17\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$),降温速率按照不大于 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 控制,日平均降温不宜超过 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且冷却降温过程应连续平顺,防止因通水不足及通水中断等原因造成的温度回升,中期通水冷却时间不少于21 d,通水流量不宜超过 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$ 。

③为防止中期冷却阶段温度回升幅度过大,应根据温度测量成果在混凝土温度回升值达到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,及时进行通水降温。冬季浇筑混凝土、外界气温低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,由于水温、气温相对较低,通水量偏大时可能会出现混凝土过冷

现象,应根据施工情况对通水流量进行调整。中期冷却期间,同一浇筑块的温度差异按照小于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行控制。

(3) 二期冷却要求。

①二期冷却前,混凝土温度应达到中期通水冷却目标温度 T_b ,二期冷却开始时,混凝土龄期应达到100 d。根据温度梯度控制要求和接缝灌浆施工进度计划开始二期通水冷却,至接缝灌浆开始前完成二期冷却。二期冷却的主要目的是将大坝混凝土温度降低至封拱温度 T_c 。二期通水冷却阶段,冷却水管入口处的参考通水温度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,混凝土温度与冷却水管进口的水温之差不应超过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。二期通水温度与混凝土温度之差应控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

②二期冷却目标温度为 T_c ,温度变化幅度应控制为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温速率按照不大于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 控制,±平均降温幅度按照不超过 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 控制,且冷却降温过程应连续平顺,防止因通水不足及通水中断等原因造成的温度回升。二期通水冷却的时间不少于30 d。对于二期冷却的结束时间按其上部要求的同冷区是否达到封拱温度进行控制,通水流量为 $1.2\text{ m}^3/\text{h}$ 。

③为防止二期冷却阶段降温速率过快、降温幅度过大,应加大温度观测频次并根据温度测量成果及时调整通水流量。施工过程中应总结不同龄期混凝土合适的降温通水流量。冬季浇筑混凝土、外界气温低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,由于水温、气温相对较低,通水量偏大时可能会出现混凝土过冷现象,应根据施工情况对通水流量进行调整。二期冷却期间,同一浇筑块的温度差异按照小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 控制。

④接缝灌浆前,应在各灌区选取3~4层冷却水管进行闷温测温,结合温度传感器测温成果综合判定其是否达到设计封拱温度。接缝灌浆期间应根据温度测量成果判定灌区温度是否维持在设计封拱温度,应动态调整通水冷却措施,直至封拱

灌浆完成。

3.4 表面养护控制措施

3.4.1 混凝土表面保温

(1)混凝土浇筑层面、坏层面间歇期覆盖 4 cm 厚、内装聚乙烯卷材、颜色统一的保温被^[4],直至其上层混凝土浇筑时揭开。浇筑层内的钢筋、模板拉条、止水等特殊部位时使用统一厚度为 4 cm 的聚乙烯卷材严密覆盖。当浇筑层面在冬季出现长间歇或遭遇气温骤降时,该层面上的保温被应适当加厚。

(2)拱坝横缝面拆模后,立即覆盖 4 cm 厚的聚乙烯卷材,其保温材料统一采用横向紧贴被保护面,横缝面保温至相邻坝段混凝土浇筑至相应高程时方能逐层拆除。

(3)拱坝上、下游面拆模后应立即进行消缺,并在拆模后 3~5 d 内覆盖厚度为 4 cm 的聚苯乙烯板进行保温养护。

(4)坝体孔口溢流面、闸墩表面部位拆模后,立即覆盖厚度为 4 cm 的聚苯乙烯板进行常年保温。

(5)在泄洪中孔、生态流量泄放孔孔口流道施工过程中,对其进出口两端采取临时挡风措施,其高度应不低于已浇筑边墙并在流道内分段悬挂保温被以减少空气流通。孔口形成后,采用防雨布进行临时封闭。

(6)施工过程中,及时对坝内廊道、电梯井、通气孔、吊物孔及其他各类孔洞洞口采取有效措施进行临时封闭保护。

3.4.2 混凝土保湿养护

(1)混凝土初凝后 3 h 开始实施保湿养护^[5],混凝土的养护时间不小于 28 d;对于重要部位以及闸墩、抗冲磨混凝土等特殊部位宜延长养护时间。

(2)对于新浇混凝土层面采用湿养护方法,以保持其表面持续湿润(或养护至新混凝土覆盖),养护需保持连续性。混凝土收仓后,采用喷雾法保湿

养护;混凝土终凝后改为流水养护或旋喷养护。

(3)模板与混凝土表面在模板拆除前及拆除期间均需保持潮湿状态,所采用的方法是让养护水流从混凝土顶面向模板与混凝土之间的缝渗流以保持其表面湿润。流水养护在模板拆除后继续进行,缝面养护至混凝土覆盖,其余表面养护至保温材料覆盖。

(4)廊道及孔口流道内采用两端封闭、内部喷雾的方法养护。

(5)混凝土养护需配备专人负责并做好养护记录。每隔 2 h 应检查一次养护的情况:气温高时加密巡查并根据检查结果及时调整养护措施以保证混凝土表面湿润。

4 结 语

杨房沟水电站混凝土双曲拱坝施工通过采取精细化、智能化的温度控制措施,使混凝土各项温度控制指标满足技术要求,温度控制总体水平优秀,有效地防止了影响拱坝结构安全和使用的裂缝发生,在保证混凝土质量的情况下,实现了资源节省,经济高效的目标。

参考文献:

- [1] 郭传科,刘西军,殷亮,黄耀辉.雅砻江杨房沟水电站拱坝混凝土温控防裂设计研究[J].水利水电快报.2021,42(6):31-34.
- [2] 黄艳梅.碾压混凝土大坝分层施工温控技术[J].四川水力发电.2021,40(1):21-24.
- [3] 混凝土坝温度控制设计规范,NB/T 35092-2017[S].
- [4] 张乃盛.高薄拱坝混凝土施工温度控制及防裂措施浅析[J].水利科技.2014,37(2):66-67.
- [5] 水工混凝土施工规范,DL / T 5144-2015[S].

作者简介:

叶劲松(1976-),男,四川彭山人,项目副经理,工程师,从事水利水电工程施工质量管理工作;

刘晓龙(1994-),男,内蒙古赤峰人,项目质量部副主任,助理工程师,从事水利水电工程施工质量管理工作;

李雷刚(1993-),男,甘肃平凉人,项目质量部副主任,助理工程师,从事水利水电工程施工质量管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

固增项目获评年度优秀团队荣誉称号

2022 年 1 月 24 日,固增水电站召开年度总结表彰大会,项目总承包部被授予“2021 年度优秀团体”“2021 年度安全生产先进单位”等荣誉称号。电站开工以来,先后遭遇不良地质条件、隧洞塌方、特大涌水、有毒有害气体、新冠疫情等不利因素影响。面对困难,项目团队迎难而上、精心部署,保证安全、质量零事故,圆满完成了工程建设各项目标任务,充分展现了央企的责任和担当。表彰会上,业主单位认为项目团队通过科学管理、设计优化、高效施工、创新工法等系列举措,超预期实现了引水隧洞提前贯通、首部枢纽具备蓄水条件、输水系统具备充水条件、首台机组具备发电条件等重大节点目标,对工程设计、采购以及施工质量给予了高度肯定。

(水电七局王军红 供稿)