

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.040

# 锦屏一级特高拱坝混凝土 4.5 m 仓层厚度施工关键技术

王继敏, 段绍辉, 郑江, 宁金华, 胡书红

(雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610016)

**摘要:** 拱坝混凝土浇筑仓层厚度是影响拱坝混凝土施工质量和进度的关键因素之一, 混凝土浇筑仓层厚度高度的突破面临温控防裂、三大高差控制和体型控制等一系列挑战, 但同时也可以为工程建设带来巨大的进度和经济效益。针对锦屏一级特高拱坝混凝土施工采用 4.5 m 仓层厚度时的关键技术问题开展研究, 研究成果工程应用效果显著, 可为其它高拱坝筑坝时面临的类似问题提供技术借鉴。

**关键词:** 特高拱坝; 4.5 m 仓层厚度; 体型控制; 温控防裂; 施工进度

**中图分类号:** TV 52    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0580-05

## Key construction techniques of 4.5 m thick warehouse layer of Jinping level I super high concrete arch dam

WANG Ji min, DUAN Shao hui, ZHENG Jiang, NING Jin hua, HU Shu hong

(Yalong River Hydropower Development Company, LTD, Chengdu 610016, China)

**Abstract:** The warehouse layer thickness of pouring concrete arch dam is one of the key factors affecting the construction quality and progress. The breakthrough of the height of warehouse layer thickness of pouring concrete faces a series of challenges including the temperature control and crack prevention, three height difference control, and body control, but it also provides the tremendous progress and economic benefits for the construction. In this paper, the key construction techniques of the 4.5 m thick warehouse layer of Jinping level I super high concrete arch dam were investigated. The research results can provide technical support for similar projects in future.

**Key words:** super high concrete arch dam; 4.5 m thick warehouse layer; body control; temperature control and crack prevention; construction progress

20 世纪中国最高拱坝二滩(高 240 m)的顺利建成, 为高拱坝的建设积累了宝贵经验。近年来, 随着西部水电大开发建设高潮的兴起, 一批 300 m 级特高拱坝相继开工建设和投入运行, 如黄河拉西瓦(坝高 250 m)、澜沧江小湾(坝高 294.5 m)、金沙江溪洛渡(坝高 284.5 m)、雅砻江锦屏一级(坝高 305 m)<sup>[1]</sup>; 还有一批特高拱坝正在设计中, 如金沙江的白鹤滩(坝高 275 m)、乌东德(坝高 270 m)、怒江的马吉(坝高 290 m)、松塔(坝高 313 m)等。在高拱坝施工中, 如果孔口等结构部位备仓和浇筑时间长, 容易导致相邻坝段高差和全坝段高差过大的问题, 直接影响到大坝的结构应力, 增大开裂风险<sup>[2]</sup>。目前, 提高拱坝浇筑速度的措施主要是加大施工资源投入、缩短转仓时间、优化调配缆机等<sup>[3-4]</sup>。但是, 许多特大型水电工程往往地处深山峡谷地区, 施工场地狭

小, 不利于场内施工设施布置与交通运输, 上述措施难以发挥有效作用<sup>[5]</sup>, 而且随着施工技术和和管理水平的提供, 一些常规措施的效用已经发挥到极限。为了进一步提高拱坝浇筑上升速度, 提高浇筑仓层厚度成为另一种解决思路, 它可以减少大坝总仓数, 以及转仓和备仓次数; 同时, 将 3 m 升层与 4.5 m 升层相结合使用可有效控制相邻坝段高差和全坝段高差, 为改善拱坝应力性态提供有效保障。二滩拱坝原合同规定浇筑仓层厚度为 1.5 m, 后经大量分析研究, 大胆地将 1.5 m 仓层厚度增加到 3 m 仓层厚度, 不但提高了浇筑块的抗裂能力, 而且为大坝混凝土浇筑抢回了 4 个月工期, 后续高拱坝浇筑仓层厚度均沿用了其模式<sup>[6]</sup>。朱伯芳院士提出: 对于大型工程, 预冷和水管冷却是主要降温手段, 层面散热在温度控制中的地位已下降, 当有足够浇筑能力时, 可采

收稿日期: 2014-07-03    修回日期: 2015-04-09    网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0841.007.html>

作者简介: 王继敏(1964), 男, 湖南人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水电科研、设计、建设管理方面研究。E-mail: wangjimin@ylhdc.com.cn

通讯作者: 郑江(1986), 男, 四川人, 工程师, 主要从事水电科研及建设管理工作。E-mail: zhengjiang@ylhdc.com.cn

用较厚的浇筑层<sup>[7]</sup>。

锦屏一级双曲拱坝为高山峡谷地区复杂地质条件下修建的特高拱坝,坝顶坝高305.00 m,拱冠梁顶厚16.00 m,拱冠梁底厚63.00 m,顶拱中心线弧长552.23 m,厚高比0.207,弧高比1.811;坝体总共26个坝段,坝体混凝土方量约476.47万m<sup>3</sup>。由于坝肩与坝基的复杂地质条件和河床高地应力条件的开挖支护,以及砂岩骨料生产等难题超出原设计预期,工期延后约9个月,拱坝高强快速施工问题突出;经拱坝混凝土浇筑施工仿真分析,与原4台缆机3.0 m浇筑仓层厚度相比,至具备首台机组蓄水发电条件时,采用增加1台缆机4.5 m仓层厚度+3.0 m仓层厚度(孔口结构仓)可缩短工期约4.5个月;经拱坝温度应力仿真分析,采用更严格的温控措施可以满足温度应力控制在原设计要求范围内;在现场试验仓浇筑的基础上,除孔口坝段外,全坝推广采用4.5 m仓层厚度浇筑。本文就特高拱坝混凝土施工4.5 m仓层厚度所面临的温控防裂、三大高差控制和体型控制等关键问题及解决方法进行了研究,研究成果在工程建设中成功实践,可为后续工程提供借鉴。

## 1 温控防裂

### 1.1 温度控制标准

#### 1.1.1 工程温控防裂难点

锦屏一级特高拱坝结构特点及温控防裂的难点主要为:(1)拱坝加上下游贴角最大底宽超过80 m,基础约束范围较大<sup>[8]</sup>;(2)大部分坝段坐落在陡坡上,基础约束范围大;(3)7个孔口坝段有4层孔口浇筑部位,结构复杂<sup>[9]</sup>;(4)混凝土原材料性能不优,早期强度低,抗裂能力弱<sup>[10]</sup>;(5)河床坝基有盖重固结灌浆在低温季节进行不利于温控防裂;(6)河谷狭窄,中下部已封拱灌浆区域对上部混凝土形成较强的拱向约束<sup>[11]</sup>。

#### 1.1.2 混凝土温度控制标准

基于工程难点,锦屏一级拱坝全坝范围按约束区进行温度控制设计。拱坝采用温差控制标准: $\Delta T \leq 14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (其中 $\Delta T$ 为混凝土最高平均温度与封拱温度之差);最高温度控制标准为 $T_m \leq T_d + \Delta T$ (其中 $T_d$ 为封拱温度)。根据不同的部位,最高温度控制为 $26\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,封拱温度及最高温度分区见图1。

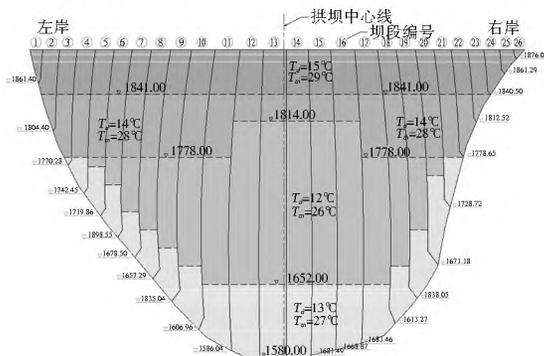


图1 封拱温度及最高温度分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of joint closure temperature and maximum temperature

锦屏一级拱坝混凝土冷却分一期、中期和二期三期冷却至封拱温度。一期冷却控制最高温度,不小于21 d,目标温

度 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温速率 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ;中期冷却防止温度回升,不小于28 d,目标温度 $17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温速率 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ;二期冷却至封拱温度, $12\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不小于42 d,降温速率 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。同一仓内温差控制不大于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,上下层仓温差控制在 $4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

#### 1.1.3 冷却水管布设方式

根据已有经验和仿真分析成果,不同部位采用不同的冷却水管布置方式:非约束区按 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (水平间距 $\times$ 垂直间距),河床坝段约束区按 $1.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,岸坡坝段约束区按 $1.0\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ,孔口约束区按 $0.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,牛腿闸墩按 $0.8\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 。

### 1.2 温度应力实时仿真分析

为分析4.5 m仓层厚度的可行性,建立典型河床坝段、陡坡坝段计算模型,计算分析同等条件下3 m仓层厚度浇筑和4.5 m仓层厚度浇筑温度场、温度应力和安全系数的差别。选用11号至13号三个坝段,建立12号河床坝段计算模型,11号坝段和13号坝段作为边界条件,如图2所示。选用18号、19号边坡坝段,建立陡坡坝段计算模型,见图3。温控计算采用的边界条件见图4。

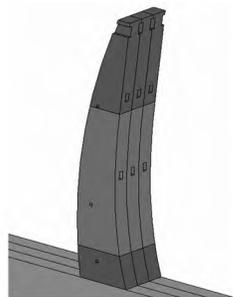


图2 12号河床坝段模型

Fig. 2 The model of 12# river bed dam section

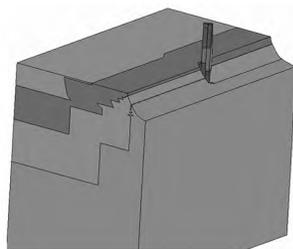


图3 18、19号陡坡坝段模型

Fig. 3 The model of 18# and 19# steep slope dam section

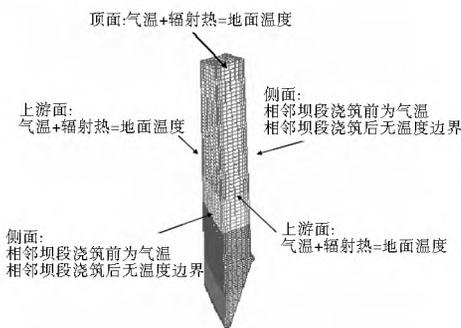


图4 温度边界条件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of temperature boundary conditions

河床坝段非约束区四种典型工况的仿真计算结果见表

1, 4.5 m 浇筑比 3 m 浇筑最高温度略高, 相差约  $0.3^{\circ}\text{C}$ , 最高温度均满足设计标准要求。最大应力 4.5 m 浇筑比 3 m 浇筑略大, 非约束区最大第一主应力分别为  $1.62\text{ MPa}$  和  $1.50\text{ MPa}$ , 按照 120 d 龄期 B 区普通混凝土 C18035 的设计抗拉强度  $3.15\text{ MPa}$  计算, 安全系数分别为 1.94 和 2.10。

表 1 河床坝段非约束区 3 m 仓层厚度与 4.5 m 仓层厚度对比

Tab. 1 Comparison of two different dam blocks with the thicknesses of 3 m and 4.5 m in the non restrained area of river bed dam section

计算坝段	方案号	浇筑仓层厚度 / m		施工进度	最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	非约束区顺河向	
		已浇筑	未浇筑			最大应力 / MPa	安全系数
河床坝段 12 号	12.5	实际情况	3	3m, 4 台缆机	25.88	1.50	1.94
	12.6	实际情况	3	3m, 5 台缆机	25.88	1.50	1.94
	12.7	实际情况	4.5	4.5m, 4 台缆机	26.10	1.62	2.10
	12.8	实际情况	4.5	4.5m, 5 台缆机	26.10	1.62	2.10

陡坡坝段非约束区四种典型工况的计算结果见表 2, 4.5 m 浇筑比 3 m 浇筑最高温度略高, 相差约  $0.4^{\circ}\text{C} \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ , 最高温度均满足设计标准要求。最大应力 4.5 m 浇筑比 3 m 浇筑略大, 非约束区最大第一主应力  $1.40\text{ MPa}$  和  $1.20\text{ MPa}$ , 按照 120 d 龄期 C 区普通混凝土 C18030 的设计抗拉强度  $2.60\text{ MPa}$  计算, 安全系数分别为 1.86 和 2.17。

表 2 陡坡坝段非约束区 3 m 仓层厚度与 4.5 m 仓层厚度对比

Tab. 2 Comparison of two different dam blocks with the thicknesses of 3 m and 4.5 m in the non restrained area of steep slope dam section

计算坝段	方案号	浇筑仓层厚度 / m		施工进度	非约束区最高温度脱离岸坡	非约束区	
		层厚度 / m	厚度 / m			最大应力 / MPa	安全系数
岸坡坝段 20 号	20-12	3	3m, 4 台缆机	26.1	1.20	2.17	
	20-13	3	3m, 5 台缆机	25.7	1.20	2.17	
	20-14	4.5	4.5m, 4 台缆机	26.4	1.40	1.86	
	20-15	4.5	4.5m, 5 台缆机	25.8	1.40	1.86	

从计算结果来看, 现有温控标准和措施条件下, 4.5 m 仓层厚度浇筑的最高温度满足设计要求, 非约束区抗裂安全系数大于 1.8。因此, 在当前温控措施条件下, 4.5 m 浇筑仓层厚度的浇筑方案在非约束区总体是可行的。

根据拱坝月度浇筑计划, 每月根据最新浇筑形成面貌进行温度应力实时动态仿真分析, 根据分析结果优化浇筑分层方案, 有效控制 4.5 m 仓层厚度浇筑温控防裂风险。

### 1.3 大体积混凝土温度智能化控制系统

锦屏一级坝体混凝土内部用于温控的温度计数量极其庞大<sup>[2]</sup> (每一个仓放置了 1~9 支, 共埋设温度计 4050 支), 如果采用人工观测, 工作量巨大, 且及时性无法保障。为了更加高效、准确和及时的掌握混凝土内部温度, 并对混凝土温度进行准确控制、对异常情况早发现早分析早处理, 参建单位研发并实施大体积混凝土温度智能化控制系统, 系统由大坝混凝土温控监测自动化系统, 混凝土温控信息集成系统、混凝土温度控制冷却通水信息反馈自动控制系统等模块共同构成(图 5), 实现了温度控制、采集、传输的智能化和网络化管理。

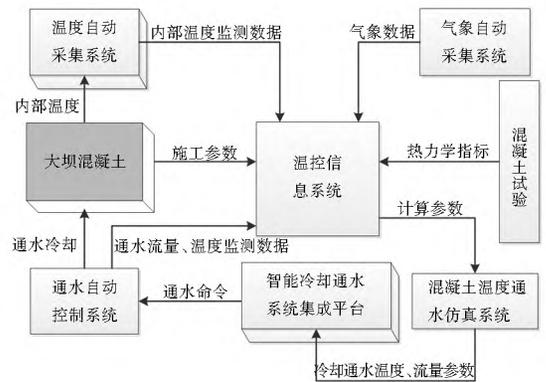


图 5 大体积混凝土温度智能化控制系统结构

Fig. 5 Structural diagram of intelligent temperature control system of large volume concrete

## 2 三大高差控制标准

由于锦屏一级拱坝坝段数目少, 而孔口坝段较多, 结构仓备仓周期长, 大坝混凝土浇筑进度计划分析认为: 全坝采用 4.5 m 仓层厚度浇筑方案时, 孔口坝段的悬臂高度达到 75 m, 相邻坝段高差达到 18 m, 坝段间最大高差达到 36 m, 这将突破原设计要求悬臂高度不大于 60 m (孔口坝段 50 m)、相邻高差不大于 12 m、最大高差不大于 30 m 的限制。因此, 有必要通过拱坝 4.5 m 仓层厚度施工整体结构应力仿真与稳定分析研究(选择典型坝段(14 号坝段)和陡坡坝段(20 号坝段), 分别采用材料力学方法和有限元方法, 研究不同悬臂高度时的坝体的稳定性和应力分布, 以及横缝面开裂风险), 获得锦屏一级拱坝悬臂高度、相邻高差和最大高差控制标准, 且为进一步修订相关技术标准提供科学技术依据。研究结果表明: 现有三大高差条件下, 陡坡和河床典型坝段在施工期自重作用下均为压应力; 温度和自重综合作用下, 应力小于设计允许拉应力, 仅在陡坡坝段建基面附近存在一定的应力集中, 应做好接触灌浆; 典型坝段抗滑稳定安全系数满足设计要求; 暴露的横面在长短周期温度荷载作用下, 有一定开裂风险, 采取设计保温措施后, 安全系数可大于 1.8。综上所述, 现有进度条件下的悬臂高度、相邻高差和最大高差的控制总体是合适的。

## 3 体型控制

根据混凝土双曲拱坝的结构特点和施工需要, 施工过程中采用直模板代曲拟合抛物线坝面, 4.5 m 仓层厚度比传统的 3 m 仓层厚度面临更大的体型控制难度, 因此模板设计和现场施工精度控制是拱坝体型控制的关键<sup>[13]</sup>。

### 3.1 模板设计与施工控制

为了既能满足大坝坝形不断变化的要求, 又能最大限度的提高模板周转效率, 4.5 m 仓层浇筑采用重型悬臂模板。模板设计中, 垂直方向上按 4.5 m 浇筑层高配置面板, 考虑坝面坡度影响, 模板有效使用长度变化范围为 4.5~4.9 m, 因此确定的 4.5 m 仓层模板尺寸为  $3\text{ m} \times 4.95\text{ m}$ 。

在同一高程面上, 在拱冠处曲率最大, 等长直线的平面模板在拱冠处拟合的坝面形体偏差最大。同时, 在不同的高程面上和坝面内、外侧, 平面模板拟合的坝面形体偏差各不相同

(拱坝上游面的最大仰角为  $10^\circ$ , 位于 1 580 ~ 1 598 m 高程, 最大倾角为  $2^\circ$ , 位于 1 871 ~ 1 885 m 高程; 下游面的最大仰角为  $4^\circ$ , 位于 1 789 ~ 1 867 m, 大倾角为  $19^\circ$ , 位于 1 580 ~ 1 598 m 高程), 模板面与坝面拟合曲线偏差见表 3。对比分析表明, 模板面与坝面拟合曲线偏差最大值达 14 mm 左右。

表 3 模板面与坝面拟合曲线偏差

Tab. 3 The bias of fitting curve between template surface and dam surface

高程/m	上游偏差/mm	下游偏差/mm
1 616	- 6. 2	+ 13. 7
1 736	- 3. 3	+ 4. 3
1 832	- 4. 0	+ 5. 2
1 885	- 4. 0	+ 4. 3

另外, 采用双支点双轴杆的支撑方式增强模板刚度, 减少模板变形量, 提高模板边界控制精度。4.5 m 仓层厚度模板设计图及现场模板总装效果图 6。

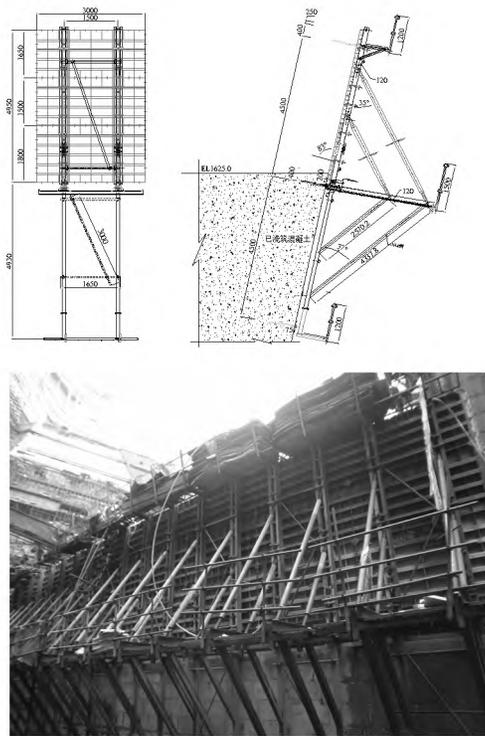


图 6 大坝悬臂模板总装图

Fig. 6 The assembly of dam cantilever templates

为了确保满足设计要求的各项控制指标, 在施工过程中还采取了一系列控制措施, 如严控模板安装精度、浇筑过程中专人全过程监测模板的变形情况、振捣过程中保持振捣器与预埋锚筋的安全距离、注意缆机下料位置以免混凝土下料冲击模板等。

### 3.2 体型控制效果

进行体型控制效果评价时, 以大坝坝段形体偏差来代表大坝已浇筑混凝土形体偏差的整体情况, 作为评价大坝已浇筑混凝土整体形体质量的依据。锦屏一级大坝混凝土形体偏差控制标准<sup>[14]</sup>: 混凝土浇筑成型后的偏差不得超过模板安装允许偏差的 100%, 取上限即[- 20~ 20 mm]。

首先根据坝面实测坐标、高程与大坝设计参数, 计算该点高程面设计坐标的偏差; 然后依据坐标偏差值计算出坝面设计曲线至实测点的法线方向上的距离, 以此作为大坝形体偏差值, 大坝形体偏差分为[< - 20 mm]、[- 20~ 20 mm]、[> 20 mm]3 个区间; 最后, 以浇筑仓为基本单元组成坝段形体偏差, 分别统计大坝上、下游坝面形体偏差区间百分比, 统计成果见表 4(截至时间为 2013 年 6 月底)。

目前大坝整体形体偏差合格率为 90.38%。考虑体型以直代曲的特点, 体型控制整体满足要求。对大坝不同仓层厚度形体偏差进行比较, 可反映仓层厚度对形体偏差影响的变化特征。大坝 1.5 m 仓层厚度形体偏差控制相对较好, 合格率为 91.5%; 大坝 3.0 m 仓层厚度和 4.5 m 审查形体偏差控制合格率稍低, 分别为 91% 和 89.5%。统计成果证明, 通过优化模板设计与全过程严控措施相结合, 4.5 m 仓层厚度体型控制与 3.0 m 仓层厚度控制效果基本一致, 且均满足设计要求。

### 4 4.5 m 浇筑仓层厚度实施效果

为加快拱坝混凝土浇筑速度, 经进度分析和温度应力仿真分析, 锦屏一级拱坝采用 4.5 m 浇筑仓层厚度必要且可行。为进一步验证和提炼施工工艺, 2010 年 5 月和 7 月在拱坝 15 号和 11 号坝段进行了大坝混凝土浇筑 4.5 m 仓层厚度试验, 完善施工工艺后, 将 4.5 m 仓层厚度逐步推广至其他坝段。2010 年- 2011 年锦屏一级大坝混凝土浇筑 4.5 m 仓层厚度主要运用于孔口坝段非结构仓、边坡坝段非基础约束区的区域<sup>[15]</sup>; 2012 年以后主要用于解决由于孔口坝段孔口结构部位和岸坡坝段基础约束区(涉及基岩面处理)因施工备仓时间长导致相邻坝段高差较大的坝段, 在脱离基础约束区和结构部位后采用 4.5 m 仓层厚度以控制相邻坝段高差。

表 4 锦屏一级水电站大坝形体偏差统计成果

Tab. 4 The statistical results of the Jinping level I dam body bias

序号	浇筑层	仓数	测点总数	形体偏差区间					
				< - 20 mm		- 20~ 20 mm		> 20 mm	
				测点数	百分比(%)	测点数	百分比(%)	测点数	百分比(%)
1	1.5m 分层形体	91	1 509	62	4.1	1 381	91.5	66	4.4
2	3.0m 分层形体	688	11 682	491	4.2	10 627	91.0	564	4.8
3	4.5m 分层形体	604	10 318	475	4.6	9 239	89.5	604	5.9
4	大坝整体体型	1 383	23 509	1 028	4.37	21 247	90.38	1 234	5.25

截止 2013 年 12 月底, 锦屏一级水电站拱坝全线浇筑到顶, 共浇筑 1496 仓(共计混凝土 507.183 万  $m^3$ ), 其中 3 m 仓层厚度和 4.5 m 仓层厚度分别为 751 仓(2.0~ 3.8 m 仓层厚

度归为 3.0 m 仓层厚度)、544 仓(4.0 m 仓层厚度以上归为 4.5 m 仓层厚度)(混凝土分别为 242.21 万  $m^3$ 、231.70 万  $m^3$ )。

## 4.1 进度效果

通过对浇筑时间以及最高温度出现时间相近的各 200 个 3 m 和 4.5 m 仓层厚度的浇筑仓最高温度情况对比可以看出:3 m 仓层厚度平均浇筑历时 32.6 h,4.5 m 仓层厚度平均历时 44.8 h,平均浇筑历时长 12.2 h,两个仓备仓时间基本相同(约 7 d)。以 18 号坝段混凝土浇筑施工为例,共计浇筑了 46 个 4.5 m 仓层厚度仓位,比采用 3 m 仓层厚度少了 23 个仓,节约工期 137.7 d。

## 4.2 温控及混凝土裂缝情况

统计成果显示,3.0 m 与 4.5 m 仓层厚度最高温度超温率分别为 97.1% 和 97.4%,非常接近。最高温度出现的时间晚 1~3 d,4.5 m 仓层厚度最高温度和 3 m 仓层厚度对比,总体规律是 4.5 m 仓层厚度最高温度略高于 3 m 仓层厚度浇筑仓,平均高 0.05℃左右。从图 7、图 8 的典型温度过程线可以看出,通过采用本文研究成果,4.5 m 仓层厚度温度过程与 3 m 仓层厚度温度过程没有实质差别。

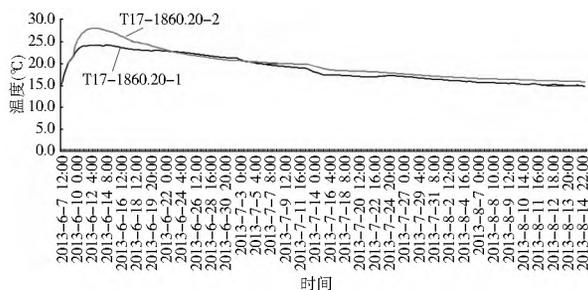


图 7 大坝典型仓(3 m 仓层厚度)温度过程曲线

Fig. 7 The temperature process curve of the typical dam block with the thickness of 3 m

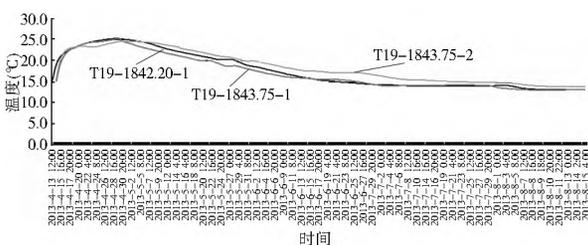


图 8 大坝典型仓(4.5 m 仓层厚度)温度过程曲线

Fig. 8 The temperature process curve of the typical dam block with the thickness of 4.5 m

拱坝全部浇筑完成后,除早期因坝基在低温季节进行固结灌浆时只在 1.5 m 和 3.0 m 仓内发现少量浅表裂缝外,没有发现有危害的温度裂缝;4.5 m 仓没有发现裂缝。2014 年 8 月工程顺利蓄水至正常蓄水位 1 880 m,大坝承受 300 m 水头,坝体没有出现渗水情况,工程运行正常。

## 5 结语

锦屏一级水电站特高拱坝混凝土浇筑突破传统的 3.0 m 仓层厚度,采用 4.5 m 仓层厚度浇筑技术,本文研究和实践了特高拱坝混凝土浇筑突破 3 m 仓层厚度达到 4.5 m 仓层厚度过程中的温控防裂、三大高差控制和体型控制等关键技术,工程建设过程中完成了 4.5 m 仓层浇筑模板设计、全过程温控仿真分析,研发实施了大体积混凝土温度智能化控制

系统,提出了 4.5 m 仓层浇筑条件下温度控制标准、新三大高差控制标准。目前锦屏一级特高拱坝大坝混凝土全线浇筑到顶,未发现任何危害性裂缝,挡水水头达到 300 m,坝身未出现渗水情况,各项监测成果显示工程工作性态正常,充分证明了此项技术的成功,并可为其它类似工程提供借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] 郑家祥, 阎士勤, 李翔, 等. 300 m 级高拱坝施工方案和进度[J]. 水电站设计, 2013, 29(04): F3. (ZHENG Jiaxiang, YAN Shi qin, LI Xiang, et al. The construction scheme and progress of the 300m high arch dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2013, 29(04): F3. (in Chinese))
- [2] 朱晓旭. 特高拱坝开裂分析方法与应用[D]. 北京: 清华大学, 2011. (ZHU Xiaoxu. Cracking analysis methods of super-high arch dams and applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [3] 吴斌平, 任炳昱, 钟登华. 基于边缘优先和空间冲突的拱坝浇筑仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1560-1567. (WU Bin ping, REN Bing yu, ZHONG Deng hua. Research of construction simulation for arch dam based on margin priority principal and spatial conflicts[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1560-1567. (in Chinese))
- [4] 钟登华, 任炳昱, 李明超, 等. 高拱坝施工质量与进度实时控制理论及应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(12): 1389-1397. (ZHONG Deng hua, REN Bing yu, LI Ming chao, et al. Theory on real-time control of construction quality and progress and its application to high arch dam[J]. Science China: Technology Science, 2010, 40(12): 1389-1397. (in Chinese))
- [5] 朱素华. 特高拱坝快速施工关键技术及其在溪洛渡工程上的应用[D]. 北京: 清华大学, 2013. (ZHU Su hua. New technologies for rapid construction of very high arch dams and their application to Xiluodu hydropower project[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese))
- [6] 长江水利委员会网络与信息信息中心. 国内外高混凝土双曲拱坝设计与施工研究[R]. 长江水利委员会网络与信息信息中心, 2007. (The Yangtze River Water Conservancy Committee on information network and Information Centre. The design and construction research of high concrete double curvature arch dam in the world[R]. The Yangtze River Water Conservancy Committee on information network and Information Centre, 2007. (in Chinese))
- [7] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J]. 水利学报, 2006, 12(32): 1424-1432. (ZHU Bo fang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 12(32): 1424-1432. (in Chinese))
- [8] 王继敏, 段绍辉, 胡书红, 等. 锦屏一级水电站特高拱坝温控防裂技术与实践[J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 41-46. (WANG Ji min, DUAN Shao hui, HU Shu hong, et al. Practice and technology of temperature control and anti-cracking for super high arch dam of Jinping I hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 41-46. (in Chinese))

(下转第 592 页)

- [12] 雷晓芳, 雷竹峰. 基于 ANSYS Workbench 的卧式深孔珩磨机机座的多目标优化设计[J]. 机床与液压, 2013(20): 5-7. (LEI Xiaofang, LEI Zhufeng. Multi-objective optimization design for tool base of horizontal deep hole honing machine based on ANSYS workbench [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013 (20): 5-7. (in Chinese))
- [13] 高东强, 毛志云, 张功学, 等. 基于 ANSYS Workbench 的 DVG850 工作台拓扑优化[J]. 机械设计与制造, 2011(2): 62-63. (GAO Dongqiang, MAO Zhizhuyun, ZHANG Gongxue, et al. Topological of the worktable of DVG850 based on ANSYS Workbench [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(2): 62-63. (in Chinese))
- [14] 徐洪斌, 鄢敏丽, 王伟, 等. 基于拓扑优化方法的分动器箱体轻量化设计[J]. 机械传动, 2014(4): 155-158. (XU Hongbin, YAN Minli, WANG Wei, et al. Lightweight design of transfer based on topological optimization method [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014(4): 155-158. (in Chinese))
- [15] 查太东, 杨萍. 基于 ANSYS Workbench 的固定支架优化设计[J]. 煤矿机械, 2012(2): 28-30. (CHATAI Dong, YANG Ping. Optimization design of fixed support based on ANSYS workbench [J]. Coal Mine Machinery, 2012(2): 28-30. (in Chinese))
- (上接第 584 页)
- [9] 周钟, 唐忠敏. 锦屏一级水电站枢纽总布置[J]. 人民长江, 2009, 40(18): 18-21. (ZHOU Zhong, TANG Zhongmin. General layout of Jinping I Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2009, 40(18): 18-21. (in Chinese))
- [10] 李光伟. 组合骨料在锦屏一级水电站高拱坝混凝土中的应用 [A]. 水库大坝建设与管理中的技术进展—中国大坝协会 2012 学术年会论文集 [C]. 郑州, 2012. (LI Guangwei. The application of composite aggregate in the concrete of Jinping I hydropower station high arch dam [A]. Technical progress in dam construction and management the academic papers of China dam association 2012 annual meeting [C]. Zhengzhou, 2012. (in Chinese))
- [11] 张德荣, 刘毅. 锦屏一级高拱坝温控特点与对策 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(4): 270-274. (ZHANG Derong, LIU Yi. Features analysis and countermeasures for concrete temperature control in Jinping I high arch dam [J]. Journal of China institute of water resources and hydropower research, 2009, 7(4): 270-274. (in Chinese))
- [12] 刘毅, 张国新, 王继敏, 等. 特高拱坝施工期数字监控方法、系统与工程应用 [J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 33-37. (LIU Yi, ZHANG Guoxin, WANG Jimin, et al. Digital monitoring method and system for construction of super high arch dam and its engineering application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 33-37. (in Chinese))
- [13] 韦林. 锦屏一级水电站高拱坝 4.5 m 分层混凝土施工试验研究 [J]. 四川水力发电, 2012, 31(2): 47-51. (WEI Lin. Experimental study on the 4.5 m lift layer concrete construction of Jinping I hydropower station high arch dam [J]. Sichuan Water Power, 2012, 31(2): 47-51. (in Chinese))
- [14] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站大坝混凝土施工技术要求 [R]. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2009. (China Hydropower Consulting Group Chengdu survey and Design Institute. Construction technique requirements of dam concrete in Jinping I hydropower station [R]. China Hydropower Consulting Group Chengdu survey and Design Institute. 2009. (in Chinese))
- [15] 王继敏, 段绍辉, 郑江. 锦屏一级拱坝建设关键技术问题 [A]. 水库大坝建设与管理中的技术进展—中国大坝协会 2012 学术年会论文集 [C]. 郑州, 2012. (WANG Jimin, DUAN Shaohui, ZHENG Jiang. The critical technical problem in the construction of Jinping I dam [A]. Technical progress in dam construction and management - the academic papers of China dam association 2012 annual meeting [C]. Zhengzhou, 2012. (in Chinese))