

白治朋, 刘西军, 贺秀儒, 等. 特高低热混凝土拱坝后期温度回升成因分析及预测研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 205-213.

BAI Zhipeng, LIU Xijun, HE Xiuru, et al. Analysis and prediction research on the causes of temperature rise in the later stage of ultra-high and low heat concrete arch dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 205-213.

# 特高低热混凝土拱坝后期温度回升成因分析及预测研究

白治朋<sup>1</sup>, 刘西军<sup>2</sup>, 贺秀儒<sup>1</sup>, 王炎<sup>1</sup>, 文勇波<sup>1</sup>, 边文鹏<sup>3</sup>

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443000; 2. 国家能源局大坝安全监察中心, 浙江 杭州 311122; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 温度回升现象在特高拱坝中普遍存在, 为更透彻地了解温度回升的原因及过程, 以某特高拱坝为例, 对温度监测资料进行分析, 通过仿真计算和回归分析相结合的方法, 构建该拱坝后期温升的计算模型, 以此对拱坝封拱后温度回升问题进行深入研究。研究表明: (1) 拱坝封拱后温度回升受外界温度内传和坝体混凝土水化热两个因素共同影响, 但外界温度内传速度较慢, 对坝体内部温度回升影响较小, 且坝体实测最高温度高于稳定温度, 因此, 坝体封拱后温度回升的主要原因是混凝土水化发热; (2) 某特高拱坝回升至最高温度需要3~6年, 达到稳定温度需要20年左右; (3) 水化热主要影响封拱后前期坝体内部的温升, 对坝体最终稳定温度场没有影响。

**关键词:** 低热混凝土; 特高拱坝; 温度回升; 仿真分析; 绝热温升

**DOI:** 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.038

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0205-09

## Analysis and prediction research on the causes of temperature rise in the later stage of ultra-high and low heat concrete arch dams

BAI Zhipeng<sup>1</sup>, LIU Xijun<sup>2</sup>, HE Xiuru<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, WEN Yongbo<sup>1</sup>, BIAN Wenpeng<sup>3</sup>

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, Hubei, China; 2. Large Dam Safety Supervision Center, Nation Energy Administration, Hangzhou 311122, Zhejiang, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The phenomenon of temperature rise is common in ultra-high arch dams. In order to gain a deeper understanding of the causes and processes of temperature rise, this article takes a certain ultra-high arch dam as an example to analyze temperature monitoring data. Through a combination of simulation calculation and regression analysis, a calculation model for the later temperature rise of the arch dam is constructed to conduct in-depth research on the problem of temperature rise after the arch dam is sealed. Results has shown that: (1) The temperature rise after arch dam sealing is influenced by two factors: the internal transmission of external temperature and the hydration heat of concrete in the dam body. However, the speed of internal transmission of external temperature is slow, and the impact on the temperature rise inside the dam body is relatively small.

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 三峡金沙江云川水电开发有限公司禄劝乌东德电厂项目(Z522302031)

作者简介: 白治朋(1992—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水库大坝防洪安全研究。E-mail: bai\_zhipeng@ctg.com.cn

通信作者: 边文鹏(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构的数值模拟研究。E-mail: bianwenpeng@edu.iwhr.com

Moreover, the measured maximum temperature of the dam body is higher than the stable temperature. Therefore, the main reason for the temperature rise after arch dam sealing is the hydration heat generated by concrete; (2) It takes 3~6 years for a certain ultra-high arch dam to reach its maximum temperature, and about 20 years to reach a stable temperature; (3) The hydration heat mainly affects the temperature rise inside the dam body in the early stage after arch sealing, and has no effect on the final stable temperature field of the dam body.

**Keywords:** low-heat concrete; ultra-high arch dam; temperature rise; simulation analysis; adiabatic temperature rise

## 0 引言

自 20 世纪 50 年代以来, 我国拱坝建设取得了举世瞩目的成就, 特别是在特高拱坝的建设技术上, 更是位居世界前列。随着小湾、锦屏一级、溪洛渡、乌东德等一系列 300 m 级的特高拱坝的陆续建成<sup>[1]</sup>, 我国不仅积累了丰富的建设经验, 还在拱坝设计与施工技术上实现了重大突破, 正式进入了拱坝建设 4.0 阶段<sup>[2]</sup>。然而, 拱坝在封拱后的温度回升现象, 尤其是特高拱坝的温度回升问题, 已经成为亟需深入研究并解决的重大课题。

温度回升现象在特高拱坝中普遍存在, 且表现出温度回升幅度大、持续时间长这两个特点。如胡佛拱坝在封拱 14 a 后内部混凝土温升可达 15 °C 左右<sup>[3]</sup>。这一现象的发生, 既有外部因素的作用, 也有内部因素的推动。外部因素涉及外界的气候条件, 如外界年均气温和地温超过坝体封拱温度, 并且淤沙高程下部实际水温高于设计库水温和坝体封拱温度, 使外部的热量向坝内传导, 引起坝体温度回升。内部因素包括混凝土等胶凝材料自身水化发热所产生的热量, 也会引起坝体温度回升<sup>[4]</sup>。混凝土坝体的温度变化直接影响其应力状态和变形, 进而影响整个结构的稳定性。封拱后, 混凝土内部的水化热逐渐释放, 加之外界环境温度的影响, 导致坝体温度分布不均, 且坝体受到左右岸以及坝基的约束, 无法自由变形, 温度回升可能产生应力集中<sup>[5]</sup>, 对拱坝的安全性与耐久性造成不利影响。对于某特高拱坝来说, 其封拱后温度回升原因的复杂性, 使得坝体后期温度场分析和预测面临诸多挑战。该拱坝的坝身厚度大, 内部温度场受多种因素影响, 难以准确模拟, 并且外部气候条件和库水条件的变化, 也会对坝体温度产生不可预测的影响, 混凝土材料的老化、开裂等长期效应, 也可能导致坝体温度场的变化。

本文通过对现有的温度监测资料进行深入分析, 并结合有限单元法对某特高拱坝的温度场进行仿真分

析和预测, 旨在通过深入研究拱坝在封拱后温度回升现象, 期望能够揭示拱坝封拱后温度回升的规律和机制。

## 1 实测资料分析

### 1.1 监测仪器布置概况

某特高拱坝最大坝高 270 m, 底厚 51 m, 厚高比仅为 0.19。为了保证大坝的运行安全, 在大坝 4<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>坝段共布置 127 支温度计对大坝进行永久温度监测。大坝目前已安装横缝测缝计共计 380 支, 横缝测缝计中均含有温度传感器配套使用, 可监测横缝部位混凝土温度。

### 1.2 实测资料分析

在 4<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>坝段共布置坝体温度计 61 支, 上下游距大坝表面 10 cm 位置埋设永久温度计 66 支。8<sup>#</sup>坝段典型温度计温度过程线如图 1 所示。温度监测数据显示, 各测点的温度过程表现出良好的规律性, 混凝土在浇筑后普遍存在温度回升现象, 截至 2024 年 5 月 6 日, 坝体内部温度回升至 21 °C 左右并趋于稳定, 封拱温度回升幅度为 5.5~9.7 °C。上游表面在蓄水前主要受气温影响, 蓄水后受库水温影响, 下游表面受气温影响, 且上下游表面温度随季节周期性变化。

## 2 高拱坝后期温升原因分析

高拱坝后期温升是一个复杂且普遍存在的现象, 其成因多样, 主要可以归结为外部环境因素和坝体内部因素。

### 2.1 外部因素

大坝所在的外部环境, 如气候条件、水体温度等, 会影响大坝的温度变化<sup>[6]</sup>。由于外界年均气温和地温高于坝体封拱时的温度, 外部热量不断向坝内传导, 造成坝体温度回升。其次, 如果淤沙高程下部的实际水温高于设计库水温和坝体封拱时的温度, 同样也会加剧外部热量向坝内的传导, 进一步推高坝体温度<sup>[7]</sup>。

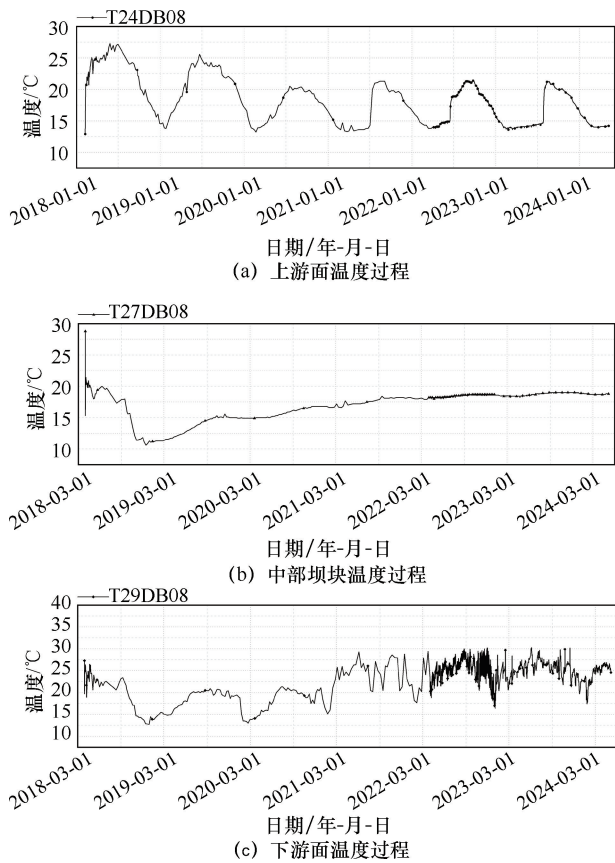


图1 8#坝段典型温度计温度过程线

## 2.2 内部因素

混凝土浇筑后,在硬化过程中会释放出热量,即水化热。在初期阶段,通过通冷却水和其他措施可以有效控制温度,但对于高拱坝而言,其体积庞大,混凝土内部的水化反应可能持续较长时间,导致后期仍有较大的发热量<sup>[8]</sup>。特别是当早期低温温控措施抑制了胶凝材料的早期水化时,后期水化发热可能会更加显著,使得坝体内部温度高于稳定温度。

## 3 环境温度对大坝影响分析

由前文分析可知,大坝后期温升的原因主要包括边界热量内传和坝体混凝土自身产生的水化热,为深入分析大坝后期温升原因,运用 SAPTIS 软件<sup>[9]</sup>对地温、气温、水温三种环境温度对某特高拱坝温度的影响进行分析。

### 3.1 地温影响分析

#### 3.1.1 计算工况

某特高拱坝坝址区地表温度在 13~31℃,建基面监测结果表明,建基面温度基本稳定在 20℃左右,以 20℃为基准研究地温对大坝温度场影响。

具体计算中,地温取固定值,坝体温度取最低封拱温度 13℃,大坝上下游面绝热,计算步长为 15 d 一步,计算 5 a,研究地温向上传导对坝体温度的影响(见表 1)。

表 1 计算工况说明

工况	说明
1	地温 20℃,坝体温度 13℃,不考虑气温和水温影响,不考虑混凝土水化热。
2	地温 23℃,坝体温度 13℃,不考虑气温和水温影响,不考虑混凝土水化热。
3	地温 28℃,坝体温度 13℃,不考虑气温和水温影响,不考虑混凝土水化热。

#### 3.1.2 影响分析

对这三种工况分别进行计算,并对结果进行处理。封拱 5 a 后距建基面距离与温度分布规律如图 2 所示。地温 20℃的计算工况下不同时间温度变化如图 3、图 4 所示。对计算结果分析可知:(1)大坝底部受地温影响明显,根据图表可以明显看出地温对坝体内部温度影响与距建基面高度成反比,且地温影响范围在距建基面 40 m 以内,在距建基面 40 m 以外的区域受地温影响不显著;(2)在不考虑气温、水温以及水化热的影响下,地温越高,大坝内温度回升就越明显,且影响范围越大,但即使地温高达 28℃,在 5a 时间内,大坝温升仍远小于实际温升。

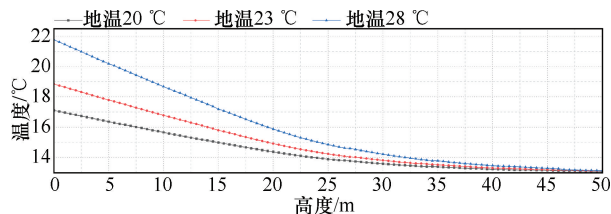


图2 封拱 5 年后距建基面距离与温度分布规律

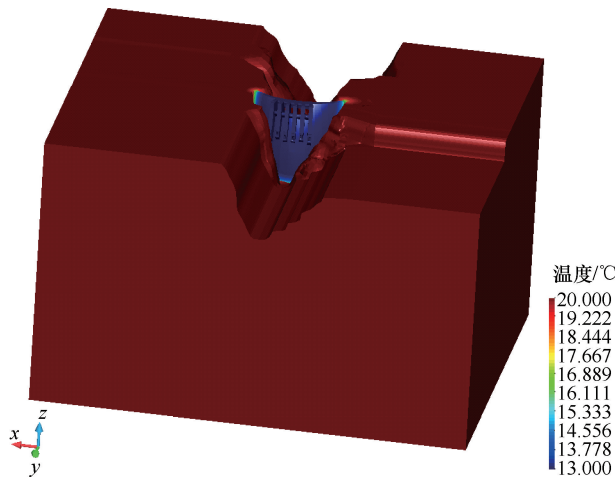


图3 地温为 20℃地基与坝体整体温度场

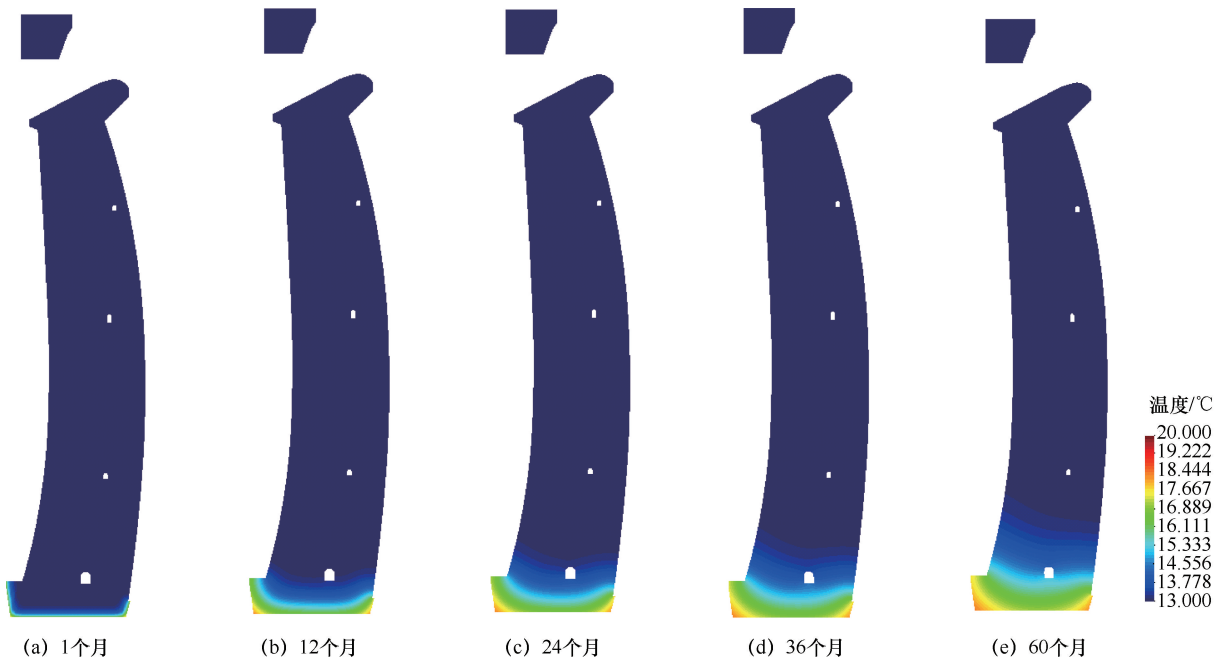


图4 地温为20℃时坝体拱冠梁剖面不同时间温度变化云图

### 3.2 气温影响分析

#### 3.2.1 计算工况及边界条件

某特高拱坝的不同高程封拱温度不同,但都在13~16℃范围内,坝址区多年平均气温高于其封拱温度(见表2)。在大坝封拱完成后,温度会向坝内传导,引起大坝内部温度回升,本节研究气温倒挂对坝体温度回升的影响。具体计算中,地温取固定值13℃,坝体温度取最低封拱温度13℃,大坝上下游面正常保温,气温采用坝址区多年平均气温。计算步长为15d一步,计算5a,研究气温向坝体内部传导对坝体温度的影响(见表3)。

#### 3.2.2 影响分析

对工况4进行计算,并对结果进行处理。如图5、图6所示,环境温度对坝体内部温度存在影响,随时间延长,在不受廊道影响的情况下,环境温度向坝体内传递的速度为一年影响深度约15m,2年影响深度约25m,3年影响至坝体内部。

### 3.3 水温影响分析

#### 3.3.1 计算工况

水库水温是水电站大坝的一个重要的温度边界条件,是大坝温度应力和温度控制的重要影响因素之一<sup>[10]</sup>。上游水库水温的分布对大坝运行期稳定温度场的分布情况有直接影响。对于拱坝来说,考虑到拱

坝坝体厚度较薄,上游水库水温分布对拱坝准稳定温度场的分布具有更为显著的影响,在大坝蓄水后,温度会向坝内传导,引起温度回升。本节研究水库水温倒挂对坝体温度回升的影响。

具体计算中,水库水温采用沿深度方向的分布状态,如图7所示,地温与坝体温度同时取最低封拱温度13℃,不考虑地温及气温影响,大坝上下游面正常保温,计算步长为15d一步,计算5a,研究水库水温向坝体内部传导对坝体温度的影响(见表4)。

#### 3.3.2 影响分析

对工况5进行计算,如图8、图9所示,在水库水温影响下,坝体温度变化明显。高程755m区域,水库水温温度较高,影响深度大致为40m,几乎影响整个坝体,坝体在755m高程内均有明显升温;高程825m区域为水库水温较低区域,影响深度大致为30m,且坝体在上述影响深度范围内均有明显降温。水库水温对坝体温度影响明显大于环境气温,0.5a影响深度在12m左右,1a影响深度在24m左右,1.5a基本影响至坝体内部。

### 3.4 综合影响分析

#### 3.4.1 计算工况

综合考虑地温、气温及水库水温进行分析。具体计算中,水库水温采用沿深度方向的分布状态,地温

表2 坝址多年平均气温

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
气温/℃	12.3	15.5	20.7	24.7	26.3	25.9	26.9	26.5	23.5	20.0	16.4	12.8	20.9

表 3 计算工况说明

工 况	说 明
4	地温 13℃, 坝体温度 13℃, 上下游正常保温, 不考虑地温和水温影响, 不考虑混凝土水化热。

表 4 计算工况

工 况	说 明
5	地温 13℃, 坝体温度 13℃, 上下游正常保温, 沿深度方向考虑上游水库水温, 不考虑气温和地温影响, 不考虑混凝土水化热。

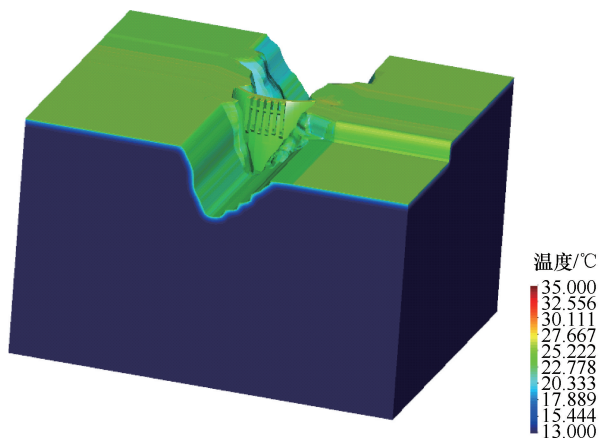


图 5 地基与坝体整体温度场(工况 4)

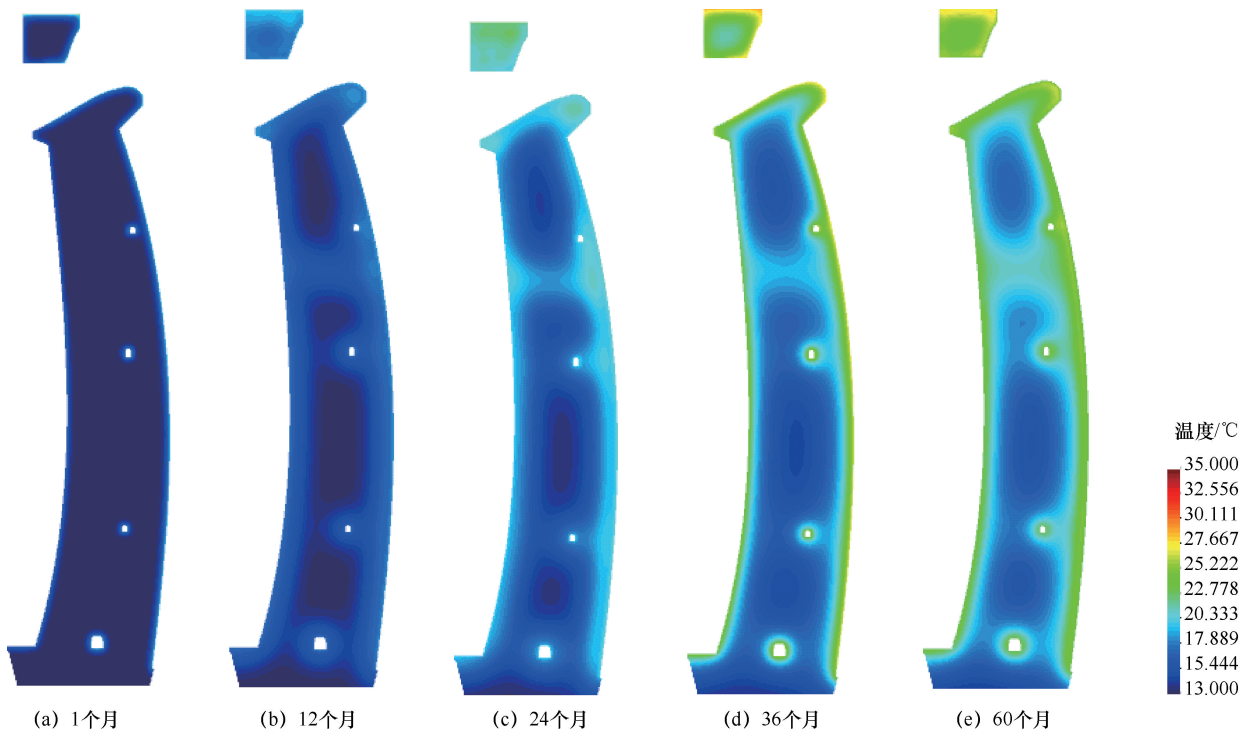


图 6 不同时间温度变化云图(工况 4)

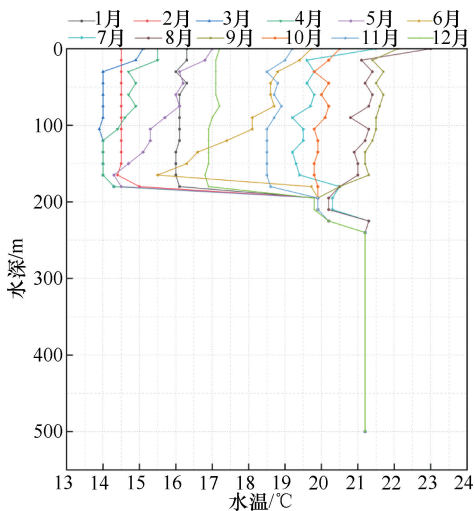


图 7 上游水温随水深变化

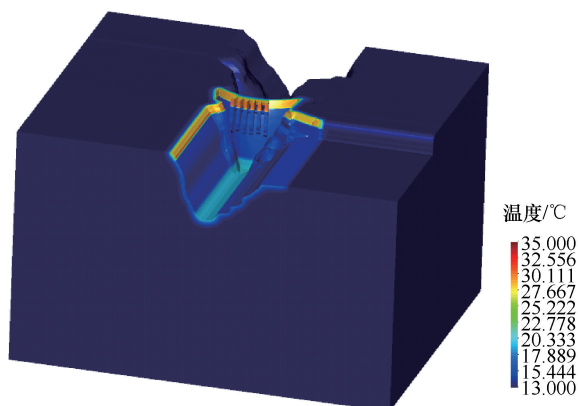


图 8 地基与坝体整体温度场(工况 5)

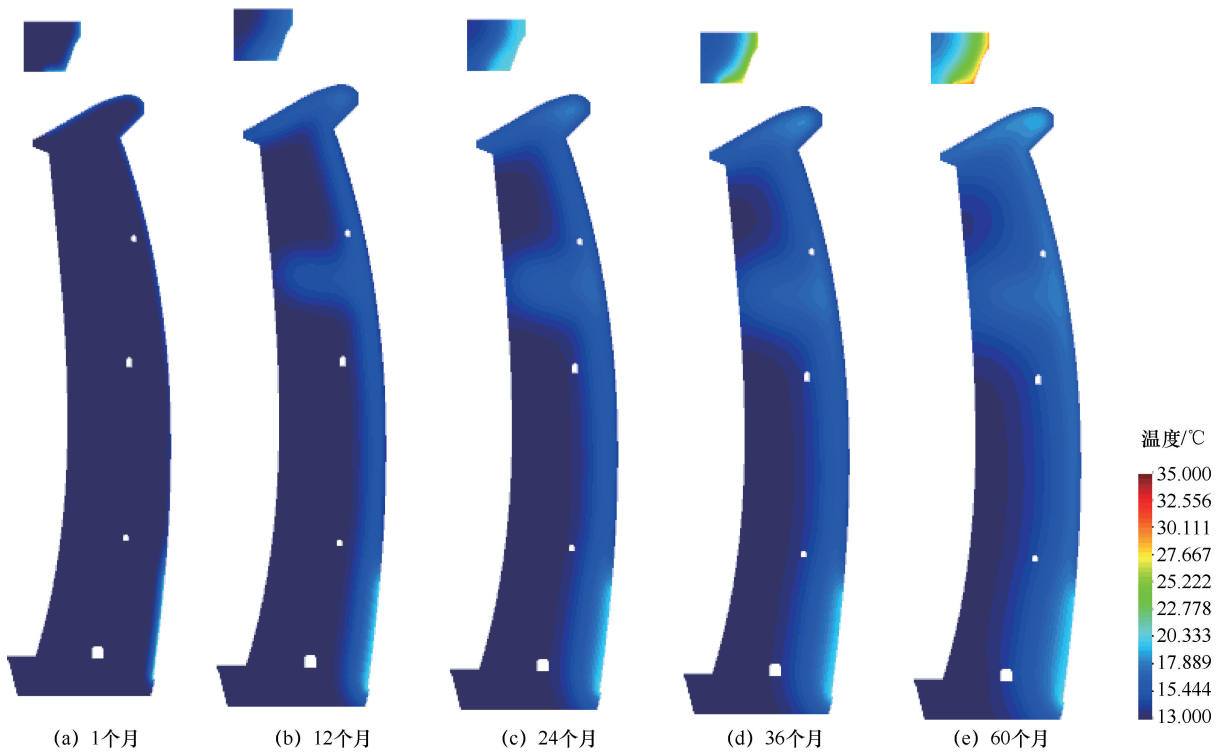


图9 不同时间温度变化云图(工况5)

取 20℃, 坝体温度取封拱温度 13℃, 考虑年周期气温变化, 大坝上下游面正常保温, 计算步长为 15 d 一步, 计算 5a, 研究综合条件下各种环境温度向坝体内部传导对坝体温度的影响(见表 5)。

表5 计算工况

工 况	说 明
6	地温 20℃, 坝体温度 13℃, 上下游正常保温, 沿深度方向考虑上游水库水温, 年周期变化气温, 不考虑混凝土水化热。

### 3.4.2 影响分析

对工况 6 进行计算, 如图 10、图 11 所示, 并对计算结果进行分析可知: (1) 在高程 725 m 区域, 主要受地温影响, 坝体上游面受水库水温底部高温影响升温剧烈, 坝体中部受到地温影响也有明显升温。(2) 在高程 755 m 区域, 主要受水库水温影响, 且此区域水库水温较高, 坝体在上述影响深度范围内有明显升温。(3) 在高程 825 m 区域, 主要受水库水温影响, 且此区域为水库水温较低区域, 坝体在上述影响深度范围内有明显降温。

## 4 封拱后绝热温升

### 4.1 热力学参数反演分析方法

(1) 以封拱灌浆日期和温度为零点, 将仅考虑边界影响的仿真温度与实测温度进行对比, 得到边界传热对大坝内部温度的影响程度。做差可以得到除外界

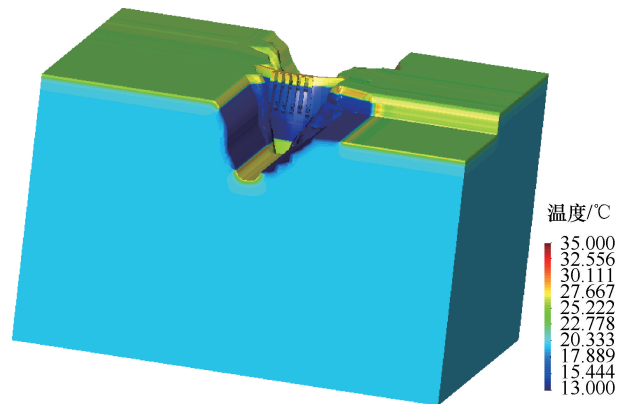


图10 地基与坝体整体温度场(工况6)

因素影响后的温度回升, 此温度回升可视为大坝混凝土后期发热导致, 即内部因素影响造成。

(2) 将各仓中心实测结果与仅考虑边界温度影响的仿真分析结果的差值曲线作为对坝体内部后期水化发热过程曲线的近似估计, 得到混凝土在不考虑边界传热情况下的残余水化温升极值, 采用公式对其进行回归分析。

(3) 以上述模型为基础进行仿真计算, 模拟分析坝体内部发热和边界温度传导共同作用下的坝体内部温度回升过程。将仿真计算结果与实际监测结果进行对比并调整模型参数, 最终得到效果良好的封拱灌浆后温度回升模型。

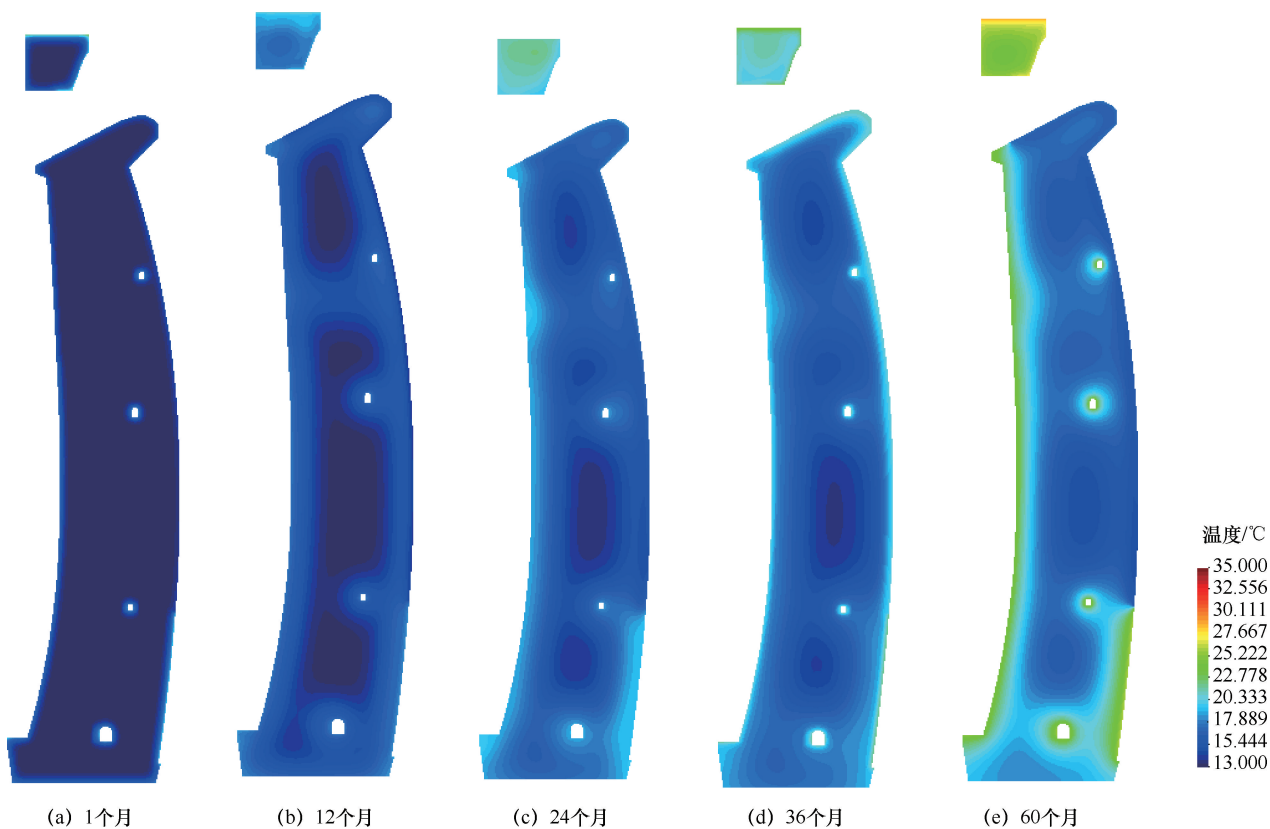


图 11 不同时间温度变化云图(工况 6)

#### 4.2 温度回升模型构建

可以利用常见的绝热温升公式对大坝后期温升模型进行回归分析, 得到封拱后绝热温升的公式

$$Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-\alpha\tau^\beta}) \quad (1)$$

由于大坝混凝土有 C<sub>180</sub>35 和 C<sub>180</sub>30 两种型号, 因此, 按照前述方法对两种材料的温度曲线进行回归分析, C<sub>180</sub>35 公式为

$$Q(\tau) = 7.8(1 - e^{-0.0019\tau^{0.98}}) \quad (2)$$

C<sub>180</sub>30 公式为

$$Q(\tau) = 7.2(1 - e^{-0.0018\tau}) \quad (3)$$

式中,  $Q(\tau)$  为封拱灌浆后任意时刻  $\tau$  时的绝热温升回

归结果;  $Q_0$  为后期绝热温升值;  $e$  为自然常数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为待定系数。

本文以 C<sub>180</sub>35 混凝土为例, 反演温升、永久温度计及测缝计测点对比曲线如图 12 所示。

基于上述数理模型进行仿真计算, 对坝体在内部混凝土水化热和环境边界温度传导共同作用下的温度回升过程进行仿真分析。将数值计算结果与实际监测结果进行对比并调整模型参数, 最终得到高拱坝后期温度回升高精度数值模型。图 13 给出了大坝 8# 坝段不同高程实测温度与仿真计算温度过程线。可以看出, 仿真计算得到的温度过程线与实测值吻合较好,

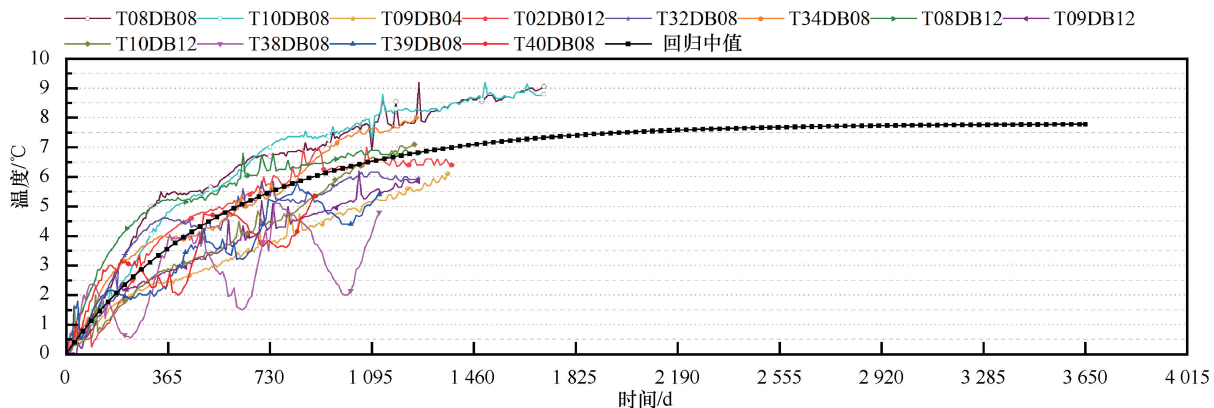


图 12 反演温升与永久温度计及测缝计测点对比变化曲线

表明构建的模型是正确合理的。

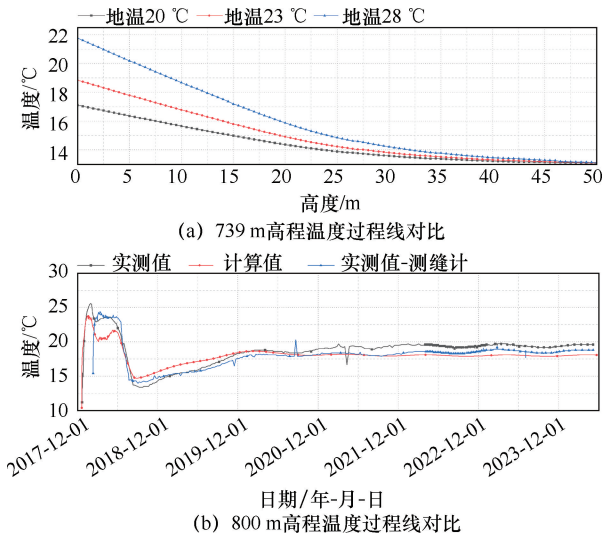


图 13 大坝 8# 坝段不同高程实测温度与仿真计算温度过程线

## 5 封拱后温度回升预测

基于反演得到的大坝封拱后温升模型，考虑真实边界条件和热学参数，开展长期运行条件下温度场的仿真计算，预测大坝在长期运行条件下温度场分布和变化规律。

### 5.1 考虑水化热的仿真预测

考虑后期水化热时，坝体各高程混凝土自封拱温

度开始，在内部水化热和外界条件共同影响下，温度逐渐变化，除坝体上、下游面受库水温 and 气温直接影响外，坝体内部温度首先升高至峰值，然后通过与外界的热交换，逐渐降低并趋于稳定温度场。

坝体内部不同高程的温度过程线如图 14 所示，根据计算结果得到如下结论：(1) 大坝封拱后温度存在回升现象，达到最高温度需要 3~6 年，且温度回升幅度为 7~9℃，与实测结果基本吻合。(2) 温度回升至最高值后在周围环境温度的影响下逐渐稳定在 20℃左右，达到稳定温度场需要 20 年左右，坝体在整个运行过程中，在 17 年左右的时间里温度高于坝体稳定温度。(3) 由稳定温度场分布云图：在高程 780 m 以下的区域内，坝体上游受堆渣影响，温度明显高于其他区域；在大坝上游面，主要受水库水温影响，坝体温度随水温周期变化；在大坝下游面，水面上主要受气温影响，水面以下受水温影响。

### 5.2 不考虑水化热的仿真预测

在不考虑后期水化热时，坝体各高程混凝土自封拱开始，在外界条件影响下，温度逐渐变化，除坝体上、下游面受库水温 and 气温直接影响外，内部温度逐渐升高并趋于稳定值。

仅在环境温度影响下的坝体内部不同高程的温度过程线如图 15 所示，根据计算结果得到如下结论：(1) 在不考虑混凝土水化热的情况下，坝体达到稳定

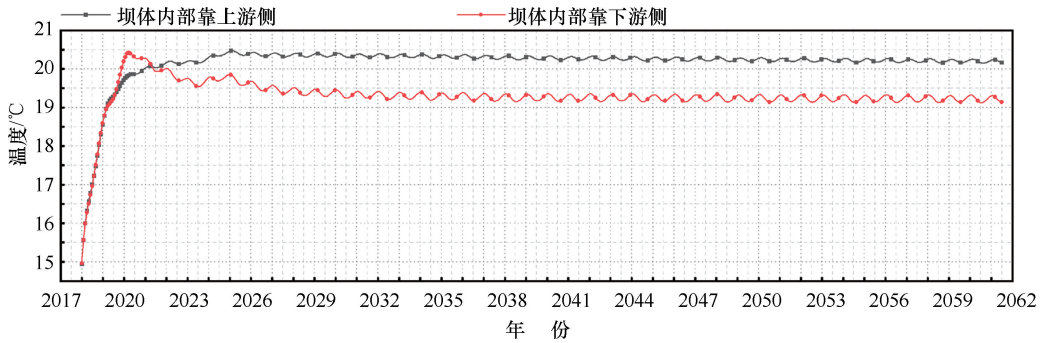


图 14 大坝 8# 坝段预测温度过程线

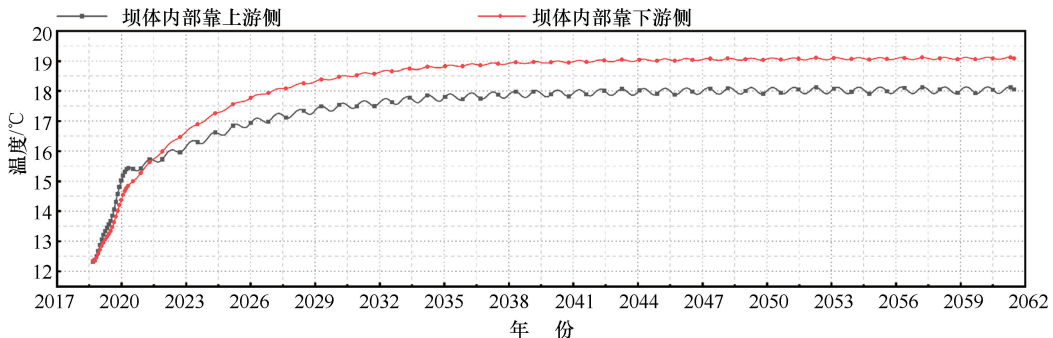


图 15 大坝 8# 坝段不考虑水化热的预测温度过程线

温度需要 20a 左右,且达到稳定温度所需要的时间随坝体厚度变化而变化,坝体厚度较大的部位,达到稳定温度所需的时间较长,坝体厚度较小的部位,达到稳定温度所需要的时间较短;(2)坝体内部的稳定温度是其最高温度,由云图可以看出,上游面主要受库水温影响,下游面水位以上主要受气温影响;(3)由两种工况下的计算结果可以看出,坝体内部混凝土水化热对坝体最终稳定温度场的分布没有明显影响。

## 6 结 论

本文以某特高拱坝为例,综合运用回归分析与数值仿真的方法对拱坝后期温度回升的现象进行研究,主要结果如下。

(1)拱坝封拱后温度回升由外界温度内传和坝体混凝土水化热两个因素共同影响。但外界温度内传的速度较慢,对坝体内部的温度回升影响较小,且坝体实测最高温度高于稳定温度,因此,坝体封拱后温度回升的主要原因是混凝土水化发热。

(2)某特高拱坝回升至最高温度需要 3~6a,达到稳定温度需要 20a 左右。

(3)水化热主要影响封拱后前期坝体内部温升,

对坝体最终稳定温度场没有影响。

## 参考文献:

- [1] 马洪琪. 我国坝工技术的发展与创新[J]. 水力发电学报, 2014, 33(6): 1-10.
- [2] 李庆斌,石杰. 大坝建设 4.0[J]. 水力发电学报, 2015, 34(8): 1-6.
- [3] 舒升,孙立祥. 基于实测资料的特高拱坝封拱后温度回升分析[J]. 科技创新与应用, 2016(25): 4-5.
- [4] 张国新,周秋景. 特高拱坝封拱后温度回升及影响研究[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1009-1018.
- [5] 王树和,许平,朱伯芳. 高拱坝全过程温度应力仿真研究[J]. 水利水电技术, 2000, 31(7): 9-12.
- [6] P·卡斯特拉诺斯,俞瑞堂. 温度作用是重力拱坝损坏的原因之一[J]. 水利水电快报, 1997(23): 11-13.
- [7] 皇夏军,胡金光. 多泥沙淤积对高混凝土拱坝温度应力影响与控制研究[J]. 中国科技投资, 2022(26): 116-118.
- [8] 于全. 大体积混凝土水化热及温度裂缝控制技术综述[J]. 科学技术创新, 2025(7): 132-135.
- [9] 张国新. SAPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]. 水利水电技术, 2013, 44(1): 31-35.
- [10] 胡平,刘毅,唐忠敏,等. 水库水温数值预测方法[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1045-1053.

(责任编辑 王海锋)