

程正飞, 黄浩东, 欧阳建树, 等. 太阳辐射对特高拱坝坝体温度及应力影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 186-196. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.014

CHENG Zhengfei, HUANG Haodong, OUYANG Jianshu, et al. Study on temperature and stress distribution characteristics of super high arch dam under solar radiation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 186-196. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.014

# 太阳辐射对特高拱坝坝体温度及应力影响研究

程正飞<sup>1</sup>, 黄浩东<sup>2</sup>, 欧阳建树<sup>2,3</sup>, 刘科<sup>4</sup>, 李明<sup>2,5</sup>, 何伟<sup>1</sup>

(1. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084;  
3. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199; 4. 中国三峡建工(集团)有限公司,  
四川成都 610000; 5. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610051)

**摘要:**【目的】研究太阳辐射作用下特高拱坝的温度及应力场分布特点及影响机制, 对拱坝运行期混凝土温控防裂具有重要意义。【方法】首先提出遮蔽作用下太阳辐射等效计算方法; 其次, 基于乌东德拱坝工程实例, 考虑云、地形和保温材料的遮蔽作用, 将坝面太阳辐射等效为局部气温增量, 模拟预测拱坝长期温度、应力场变化。【结果】分析结果显示, 太阳辐射作用下坝面温度最大升高 2~5 °C, 局部第一主应力提升 0.5 MPa, 拱坝坝面因吸收太阳辐射而产生整体性温升并在坝面附近产生一定的温度梯度。拱坝下游左岸受遮蔽作用影响较小, 温度场和应力场整体高于右岸。【结论】遮蔽作用下抵达坝体表面的太阳辐射总量有所减少, 但增大了坝面温度分布差异; 建议通过实施分区防护策略, 避免因太阳辐射分布不均而导致坝面开裂。研究成果揭示了太阳辐射作用下乌东德拱坝温度场、应力场的演化规律, 为大坝长期安全运行提供理论依据。

**关键词:** 太阳辐射; 等效计算; 温控防裂; 影响因素; 乌东德拱坝; 坝体温度; 应力; 防护措施

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.014

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV642.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0186-11



与作者互动  
听语音聊科研

## Study on temperature and stress distribution characteristics of super high arch dam under solar radiation

CHENG Zhengfei<sup>1</sup>, HUANG Haodong<sup>2</sup>, OUYANG Jianshu<sup>2,3</sup>, LIU Ke<sup>4</sup>, LI Ming<sup>2,5</sup>, HE Wei<sup>1</sup>

(1. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China; 4. China Three Gorges Construction Engineering (Group) Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China; 5. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan, China)

**Abstract** [Objective] Researching on the temperature and stress field distribution characteristics as well as mechanisms of super high arch dams under the influence of solar radiation is of great significance for crack prevention in concrete during the operation

收稿日期: 2025-05-19; 修回日期: 2025-06-09; 录用日期: 2025-06-13; 网络出版日期: 2025-11-29

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2020-50); 中国三峡建工(集团)有限公司技术服务项目(WDD/0578); 国家自然科学基金资助项目(51979146);

作者简介: 程正飞(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水电工程智能建设理论与方法研究。E-mail: chengzf@creei.cn

通信作者: 黄浩东(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构以及地质构造研究。E-mail: huanghd22@mails.tsinghua.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

period. [Methods] An equivalent calculation method was proposed for solar radiation considering shading effects. Taking the Wudongde arch dam as a case study, the study simulates and predicts long-term temperature and stress field variations by equivalently converting solar radiation on dam surfaces into local temperature increments, while accounting for shading effects from clouds, terrain, and insulation materials. [Results] The analytical result demonstrate that under solar radiation, the dam surface temperature increases by 2~5°C with localized first principal stress elevation of 0.5 MPa. The arch dam surface undergoes integrated temperature rise due to solar radiation absorption, generating discernible temperature gradients near the surface. The left bank downstream surface experiences lesser shading effects, maintaining generally higher temperature and stress fields compared to the right bank. [Conclusion] Although shading reduces total solar radiation reaching the dam surface, it amplifies temperature distribution disparities. Implementing zonal protection strategies is recommended to prevent dam surface cracking caused by non-uniform solar radiation distribution. By elucidating the evolutionary patterns of temperature and stress fields in Wudongde arch dam under solar radiation, the findings establish theoretical foundations for long-term operational safety and provide maintenance references for similar hydraulic projects.

**Keywords:** solar radiation; equivalent calculation; crack prevention; influence factor; Wudongde Arch Dam; dam temperature; stress; protective measures

## 0 引言

混凝土温控防裂是大坝的重要控制目标,对于拱坝结构安全和长期服役性能具有重要影响。混凝土温度升高的关键诱因是混凝土水化放热过程以及运行期不利环境因素。目前降低混凝土水化放热温峰的措施主要有:掺加粉煤灰、使用低热水泥和冰水混合物等;通过大体积混凝土分仓浇筑、采用智能通水冷却<sup>[1]</sup>等方法降低浇筑后前期和中期混凝土内部的整体温度。然而,混凝土拱坝在运行期间受外载荷载突变、气温、太阳辐射等影响同样会产生裂缝<sup>[2]</sup>,危害结构安全。精确描述特高拱坝受到的太阳辐射影响对于分析大坝整体稳定和应力状态具有重要意义。

太阳辐射是导致大体积混凝土局部温度升高的主要原因<sup>[3]</sup>,受太阳直射的混凝土内外温差可高达6°C<sup>[4]</sup>。自20世纪50年代初,研究人员就已开始研究太阳辐射对大坝表面的影响。太阳辐射作用主要包括直接辐射、散射辐射和地面反射三部分<sup>[5]</sup>。太阳直接辐射和散射辐射会造成大体积混凝土结构产生热量积聚,增大混凝土近表面的温度梯度;太阳辐射经地面、水面反射与天空散射综合作用于坝面,通过影响混凝土边界温度,可影响拱坝内部混凝土温度,进而影响拱坝内部温度场和应力场。1984年ICOLD发表的一份报告中将外部温度变化列为混凝土大坝强度退化的最常见原因之一<sup>[6]</sup>,研究证实热循环应力对混凝土坝强度和强度退化的重要影响<sup>[7-8]</sup>,会导致混凝土变形、开裂。以已建成的百米级碾压混凝土坝为例,温控失效是混凝土坝裂缝产生的主要原因<sup>[9-10]</sup>。

特高拱坝一般位于深切峡谷地形,且朝向由河流

走向确定,受到的太阳辐射具有不均匀性特点。国内外学者对大坝混凝土受太阳辐射影响做了深入分析,如MIRZABOZORG等<sup>[11]</sup>利用非耦合瞬态热模型分析太阳辐射,研究了坝体温度在太阳辐射影响下的不均匀分布;冯进等<sup>[12]</sup>采用光线追踪算法分析周边地形的阴影以及拱坝结构形状影响,指出非均匀温度对拱坝表面热应力和裂纹扩展有显著影响;SHEIBANY等<sup>[13]</sup>研究发现,在太阳辐射影响下伊朗Karaj混凝土拱坝局部温度最大能够比环境温度高8°C,且温度荷载对混凝土拱坝的拉应力响应有显著影响。陈拯等<sup>[14]</sup>采用ASHRAE晴空模型模拟了拱坝对太阳辐射的应力响应,发现地形和朝向对于拱坝温度场和应力场有重要影响。乌东德拱坝在浇筑过程中安装通水冷却智能温度控制系统<sup>[1]</sup>,可对拱坝坝体内部进行实时温度控制,有效解决了混凝土水化过程中坝体内温度过高的问题。然而,目前的研究中缺少太阳辐射对于特高拱坝工作状态的长期影响评估,有待进一步研究。

本文基于乌东德拱坝的工程实例,结合干热河谷环境特点,分析太阳辐射导致坝体温度升高的作用途径。考虑云量、地形等遮蔽要素的影响,将太阳辐射等效为拱坝坝面的局部气温增量,并将保温材料作用等效为放热系数,提出太阳辐射影响计算方法。通过建立乌东德拱坝在太阳辐射影响下的温度、应力分布模型,对乌东德拱坝长期运行状态下的温度场和应力场进行预测;分析太阳辐射对拱坝温度场、应力场的影响程度,并与现场数据进行比较分析,揭示太阳辐射对于乌东德拱坝的长期影响规律。最后,根据太阳辐射不均匀分布特点,提出了坝面差异化防护方法,为大坝长期安全运行提供参考。

## 1 乌东德拱坝太阳辐射的挑战及应对

### 1.1 工程背景与气候环境

乌东德水电站是实施“西电东送”的国家重大工程,其坝址位于云南省昆明市禄劝县与四川省会东县交界的金沙江上,是金沙江下游河段规划建设4座梯级水电站——乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝的最上游梯级,工程重要性等级高,属于典型的大体积混凝土工程,因此在运行期间也需要进行温控防裂。

乌东德拱坝坝址处于低纬度干热河谷地区,正面为东南朝向,中心线与指北线夹角为 $157^\circ$ ,如图1(a)所示。坝址地区太阳辐射强,且由于坝址处河谷狭窄,拱坝坝高达270 m,太阳辐射强度时空差异明显;水汽交换剧烈且季节性强,多年平均降水量为825 mm,主要分布在6—10月,多年平均水面蒸发量2 593 mm,陆面蒸发量698 mm,多年平均日照2 158 h。

### 1.2 太阳辐射影响分析

乌东德拱坝白天日照强烈,早晚温差大,局部时段昼夜温差可达 $20^\circ\text{C}$ 以上<sup>[15]</sup>,拱坝混凝土的温控防裂面临严重挑战。虽然位于深切河谷的混凝土坝在地形遮蔽作用下每天接收的总热能可能减少

20%~30%<sup>[16]</sup>,保温材料也会减少部分抵达坝面的太阳辐射,但太阳辐射的空间分布差异会更加显著。此外,由于拱坝坝型、朝向以及太阳方位角变化等因素,不同时间拱坝部位接收到的太阳辐射有显著差异,从而导致拱坝的温度应力差异,对拱坝温控防裂有不利影响<sup>[17]</sup>。乌东德拱坝上游左右岸两侧坝面及下游坝面底部太阳辐射受两岸地形影响较大,且这种影响向坝侧及坝底部方向逐渐减小,地形影响下拱坝坝面不同位置每日受太阳辐射的影响范围示意如图1(b)(c)所示。这种空间分布差异可能导致拱坝出现局部温度梯度过大、应力集中等工程问题。

## 2 遮蔽作用下太阳辐射等效计算方法

太阳辐射对大坝坝面边界温度的影响包括对上、下游水位以上外露坝面附近等效气温增量,对坝顶附近等效气温增量和对上游水位以下坝面水温边界等影响。太阳辐射的影响可等效为空气温度增高 $\Delta T$ ,其计算公式为

$$\Delta T = \frac{R}{\beta} \quad (1)$$

式中, $R$ 为物体表面吸收的辐射热; $\beta$ 为物体表面放热系数。

物体表面吸收的辐射热可用下式计算

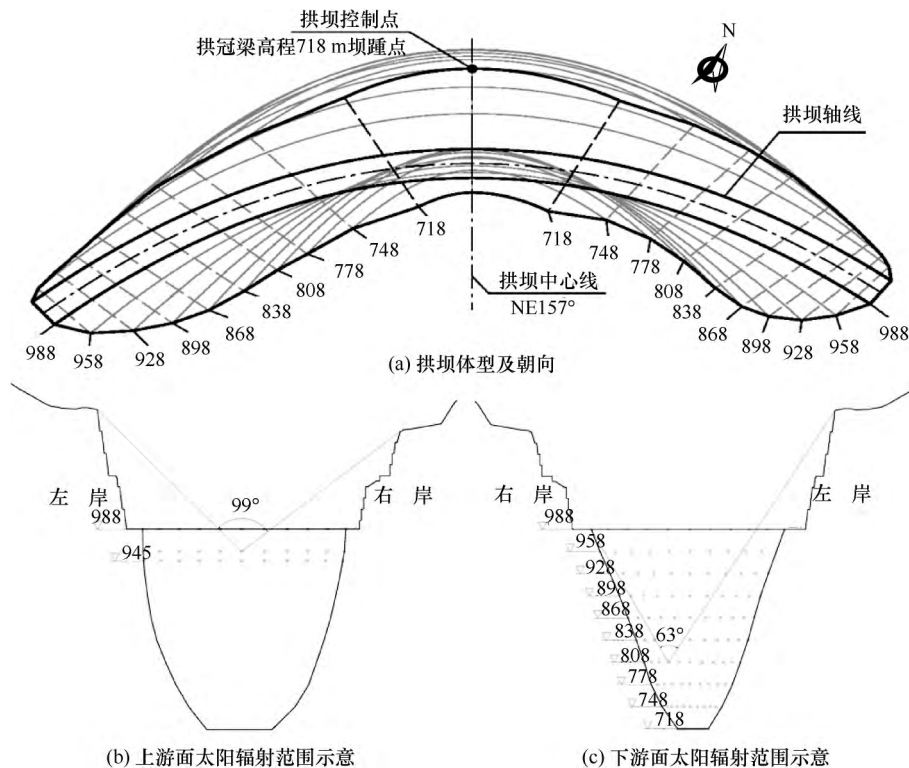


图1 乌东德拱坝整体工程分布及地形遮蔽范围示意(高程单位: m)

Fig. 1 Schematic diagram of Wudongde arch dam overall layout and topographic shading range( Elevation unit: m)

$$R = \alpha_s \cdot S \quad (2)$$

式中,  $\alpha_s$  为辐射吸收系数或黑度系数; 混凝土表面  $\alpha_s \approx 0.65$ <sup>[18]</sup>。

拱坝下游面及上游表面水上部分受日照影响, 表面温度将高于气温。根据美国垦务局坝面温度实测资料, 结合理论分析制定了图 2<sup>[4]</sup>, 用于计算日照引起的年平均温度增量。

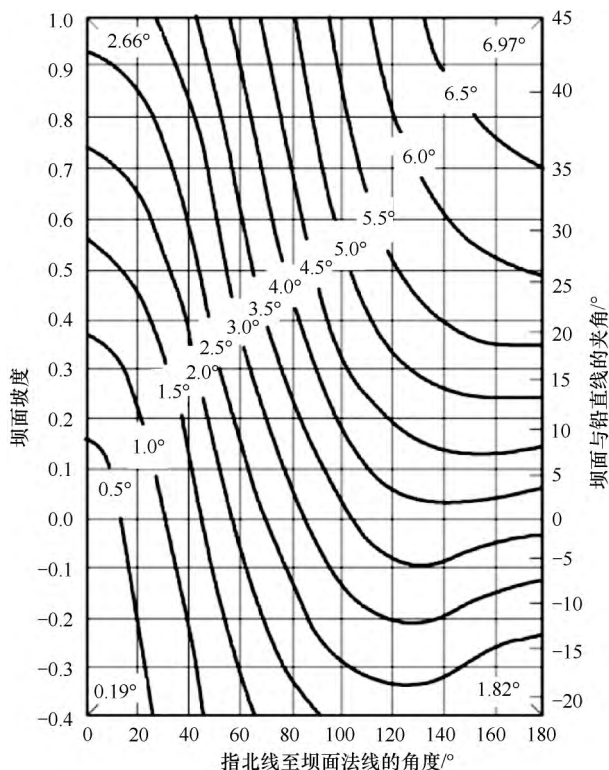


图 2 日照引起的年平均温度增量<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Annual average temperature increase induced by solar radiation<sup>[4]</sup>

实际工程中, 太阳辐射传播会受到多遮蔽因素的影响, 从而减少抵达坝面的辐射量。本研究考虑云量、地形和保温材料 3 个在太阳辐射传播过程中的遮蔽因素, 建立太阳辐射热等效作用的理论计算模型。首先基于云层对太阳短波辐射的调节机制, 提出考虑天空遮蔽效应的辐射热修正公式; 其次结合峡谷地形特征与坝体空间方位, 揭示两岸不对称辐照规律及其对辐射热分布的影响; 最后通过分析保温材料的辐射吸收-传导特性, 建立覆盖层与混凝土间的热交换等效模型。

## 2.1 区域云量

云的吸收和反射作用对到达地表的太阳辐射影响很大<sup>[19]</sup>。到达地表的太阳辐射量与日照角度及天空云量有关: 日照角度越小, 则太阳辐射在大气中经过

的路程越长, 被吸收的能量越多; 云量越大, 太阳辐射被吸收的能量越多。太阳辐射能到达表面后被反射和吸收, 能值大小受方位、纬度及季节影响。通过引入天空晴朗程度系数  $K_1$  量化云的遮蔽效应<sup>[20]</sup>, 则抵达地表的太阳辐射热公式为<sup>[21]</sup>

$$S_1 = S_0(1 - K_1 n) \quad (3)$$

式中,  $S_1$  为考虑云量的太阳辐射热;  $S_0$  为晴天太阳辐射热,  $K_1$  为不同纬度系数,  $n$  为云量, 具体取值可通过国家气象信息中心获取<sup>[22]</sup>。

## 2.2 局部地形

拱坝的地理位置和地形特点决定了坝面受到太阳辐射的时长。拱坝多建于深切峡谷地带, 两岸陡峭山体形成天然屏障, 显著改变抵达坝面的太阳辐射的空间分布。峡谷走向与太阳方位角的偏差导致坝体左右岸受辐射量差异增大, 尤其当峡谷轴线与太阳主辐射方向非正交时, 两岸山体对晨昏时段的阳光遮挡效应更为显著。坝面各点因地形高程差及相对位置不同, 实际可接收日照时长存在显著空间差异。

拱坝的双曲几何形态导致坝面法向矢量的空间异质性。不同高程的坝面坡度变化直接影响太阳入射角, 进而改变单位面积辐射接收效率。曲率半径差异使同一时段内不同坝段的辐射入射方向与坝面夹角呈现非线性变化, 形成辐射量的梯度分布特征。

为此, 引入地形系数  $K_2$  综合表征地形遮蔽与坝面坡度对太阳辐射的双重衰减作用, 其等于实际曝晒时间与理论曝晒时间的比值。利用两岸开挖地形, 可统计计算出拱坝各点法向与太阳直射的夹角  $\varphi$ , 并进一步换算为地形系数  $K_2$ 。乌东德拱坝上下游坝面的地形系数  $K_2$  如图 3 所示, 其计算公式为

$$K_2 = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \cos[\varphi(t)] \cdot S_1(t) dt}{\int_0^T \cos[\varphi(t)] \cdot S_1(t) dt}, \quad 0 \leq T_1 \leq T_2 \leq T \quad (4)$$

式中,  $S(t)$  为抵达地表的太阳辐射强度;  $T$  为区域的日照时间;  $T_1$  和  $T_2$  分别为拱坝局部在地形遮蔽作用下受太阳辐射的起始和终止时间。

由此, 得到考虑云和地形的坝面太阳辐射热  $S_2$  公式为

$$S_2 = K_2 \cdot S_1 \quad (5)$$

式中,  $K_2$  为坝面地形系数;  $S_1$  为考虑云量的太阳辐射热。

## 2.3 保温材料

保温材料吸收辐射热, 通过接触热传导, 将热量

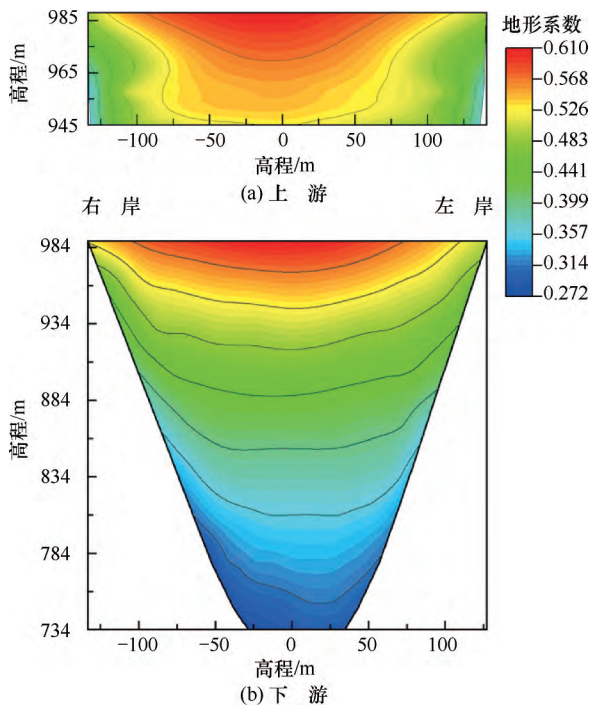


图3 乌东德拱坝上下游水面以上坝面地形系数  $K_2$   
Fig. 3 Topographic coefficient  $K_2$  of the upstream and downstream dam surface above the water level

传递给混凝土。传递过程中, 辐射热一部分通过表面热对流和发射辐射散失。记保温材料传递给混凝土的热量与其吸收辐射热量的比值为  $K_3$ , 则混凝土表面间接接收的太阳辐射热为  $R_s = K_3 \cdot R$ 。假定混凝土或保温层外部等效气温增量与其吸收辐射热和等效放热系数比值呈线性关系, 其公式为

$$\Delta T_s = f\left(\frac{R_s}{\beta_s}\right) = k \cdot \frac{K_3 \cdot \alpha_s \cdot S_2}{\beta_s} \quad (6)$$

式中,  $\Delta T_s$  为等效气温增量;  $\beta_s$  为材料表面的等效放热系数;  $k$  为无量纲系数, 通过实际监测温升数据反演获得。当混凝土表面未覆盖保温材料时, 取  $K_3 = 1$ 。

### 3 乌东德拱坝太阳辐射影响分析

#### 3.1 拱坝太阳辐射模拟

基于第2节提出的理论计算公式, 得到太阳辐射遮蔽影响下等效年均气温增量, 如图4所示。乌东德拱坝上游蓄水位较高, 暴露于空气界面的坝面面积较小。在遮蔽效应的影响下, 太阳辐射导致的等效年平均气温增量较小。拱坝上游面温升整体右岸要高于左岸, 体现了不对称地形所带来的分布差异。乌东德拱坝下游面温升整体左岸要高于右岸, 等效年均气温增量呈两岸向中心减小、整体随高程降低而减小的空间

分布特点, 且下游面受到太阳辐射的影响更大, 整体温升要大于上游面。

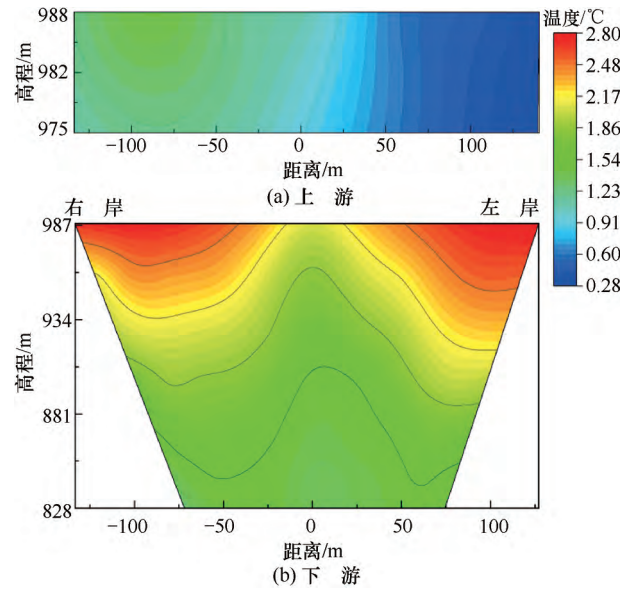


图4 太阳辐射遮蔽影响下坝面水位以上等效年均气温增量

Fig. 4 Equivalent annual mean temperature increase above water level on dam surface under shading effect

如图5所示, 建立乌东德拱坝混凝土整体有限元模型, 并根据混凝土材料分区。拱坝模型共使用单元 191 686 个, 节点 241 630 个, 其中拱坝混凝土使用单元 114 832 个, 节点 159 931 个。通过生死单元法反映乌东德拱坝整体的建设进度, 模拟每仓混凝土封拱后的温度、应力场变化。

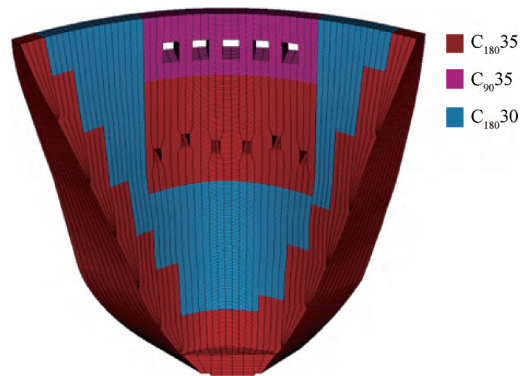


图5 乌东德拱坝模型网格划分(材料分区)  
Fig. 5 Mesh division of the Wudongde arch dam model (material zoning)

乌东德拱坝模型考虑  $C_{180}35$  (四级配)、 $C_{180}30$  (四级配) 和  $C_{90}35$  (三级配) 三种混凝土, 材料分区详如图5所示, 配合比如表1所列。

不同类型混凝土封拱灌浆后温升特性有所不同,

表1 乌东德拱坝混凝土配合比

Table 1 Concrete mix proportions for Wudongde arch dam

混凝土强度等级	水胶比	粉煤灰掺量/%	砂率/%	减水剂参量/%
C <sub>180</sub> 35(四级配)	0.5	35	25	0.6
C <sub>180</sub> 30(四级配)	0.5	35	25	0.6
C <sub>90</sub> 35(三级配)	0.5	35	25	0.6

对于这三种类型的混凝土, 基于反演得到的后期绝热温升曲线, 建立混凝土后期绝热温升模型<sup>[4]</sup>, 其公式为

$$Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-a\tau^b}) \quad (7)$$

式中,  $Q_0$  为单仓混凝土封拱后的最终绝热温升;  $Q(\tau)$  为接缝灌浆后任意时刻  $\tau$  的绝热温升;  $a$ 、 $b$  为绝热温升系数。通过实测数据反演, 得到拱坝混凝土后期绝热温升参数如表2所列。

表2 不同混凝土材料拱坝混凝土热力学特性反演参数

Table 2 Inversion parameters for concrete thermo-mechanical properties

热学特性	C <sub>180</sub> 35	C <sub>180</sub> 30	C <sub>90</sub> 35
比热 $c/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	1.04	1.07	1.01
导热系数 $\lambda/\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	7.96	7.86	7.28
最终绝热温升(封拱后起算) $Q_0/^\circ\text{C}$	4.4	2.8	5.0
绝热温升参数 $a$	0.001 2	0.003	0.000 9
绝热温升系数 $b$	1.2	1.04	1.25
泊松比	0.167	0.167	0.167
线膨胀系数/ $(10^6 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	6.5	6.5	6.5
弹性模量 $E/\text{GPa}$	30.45	29.06	30.24

拱坝温度场和温度应力仿真分析需考虑拱坝实际保温效果。拱坝顶面由于交通需要不覆盖保温材料。不覆盖保温材料的混凝土放热系数为

$13.89 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , 覆盖保温材料的上、下游面的等效放热系数分别为  $0.71 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  和  $0.93 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

模拟采用的气温边界条件基于上一年的气温监测数据, 2020年的气温监测数据表明乌东德拱坝区域最高温度在开年的第187.69 d, 年均气温为  $26.7^\circ\text{C}$ , 年均气温波动为  $5.08^\circ\text{C}$ 。因此, 2021年模拟采用的每日平均气温边界条件公式为

$$T_0 = 26.7 + 5.08 \cdot \sin\left(\frac{t - 5.19}{182.5} \cdot \pi\right) \quad t \in [0, 365] \quad (8)$$

式中,  $T_0$  为日平均气温;  $t$  为天数。

在坝前水库和坝后水垫塘蓄水情况下, 太阳辐射对正常蓄水位以下坝面温度的影响相对较小。由于水位变化频繁, 因此仅考虑坝前水库和坝后水垫塘正常蓄水位以上坝面所受太阳辐射的影响。两种工况下, 拱坝混凝土边界条件情况如表3所列。

### 3.2 温度及应力场分布

为研究太阳辐射对拱坝混凝土温度场的影响, 模拟得到拱坝2021年冬季和夏季的典型时刻拱坝温度云图, 如图6和图7所示。

乌东德拱坝在太阳辐射的影响下整体温度有所提升: 在下游坝面, 考虑太阳辐射时混凝土表面温度最大高于不考虑太阳辐射时约  $3 \sim 4^\circ\text{C}$ ; 在上游坝面, 考虑太阳辐射时混凝土表面温度最大高于不考虑太阳辐射时约  $0.5 \sim 2^\circ\text{C}$ ; 在拱坝顶部, 考虑太阳辐射时混凝土表面温度最大高于不考虑太阳辐射时约  $2 \sim 5^\circ\text{C}$ ; 在拱坝内部, 考虑太阳辐射时混凝土中心截面温度最大高于不考虑太阳辐射时约  $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 。

表3 计算工况

Table 3 Calculation cases

边界	不考虑太阳辐射	考虑太阳辐射
坝前水位以上坝面	$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_S(T - T_a)$	$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_S[T - (T_a + \Delta T_{sd})]$
坝顶表面	$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_S(T - T_a)$	$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_S[T - (T_a + \Delta T_{sd})]$
坝后水位以上坝面	$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_S(T - T_a)$	$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta_S[T - (T_a + \Delta T_{sd})]$
坝前、后水位表面水温	$T_s = T_{am}$	$T_s = T_{am} + \Delta T_w$
库水水温 <sup>[4]</sup>	$T(y, \tau) = \frac{12 - T_s \cdot e^{-0.04H}}{1 - e^{-0.04H}} e^{-0.04H} + \left(T_s - \frac{12 - T_s \cdot e^{-0.04H}}{1 - e^{-0.04H}} e^{-0.04H}\right) e^{-0.04y} + 5.08e^{-0.018y} \cdot \cos\left[\frac{(\tau - 8.65 + 1.30e^{-0.085y}) \cdot \pi}{6}\right]$	

注:  $T$  和  $T_a$  分别为混凝土表面温度和气温;  $T_s$  和  $T_{am}$  分别为表面年平均水温和当地年平均气温;  $\Delta T_{su}$ 、 $\Delta T_{sd}$  和  $\Delta T_w$  分别为太阳辐射引起的上、下游坝面和坝顶表面等效平均气温增量;  $\Delta T_w$  为太阳辐射引起的表面年平均水温增量;  $H$  为库底水深(m);  $y$  为水深(m);  $\tau$  为时间(月)。基于上述信息, 计算模拟考虑太阳辐射与不考虑太阳辐射两种工况下拱坝混凝土的温度场和应力场。

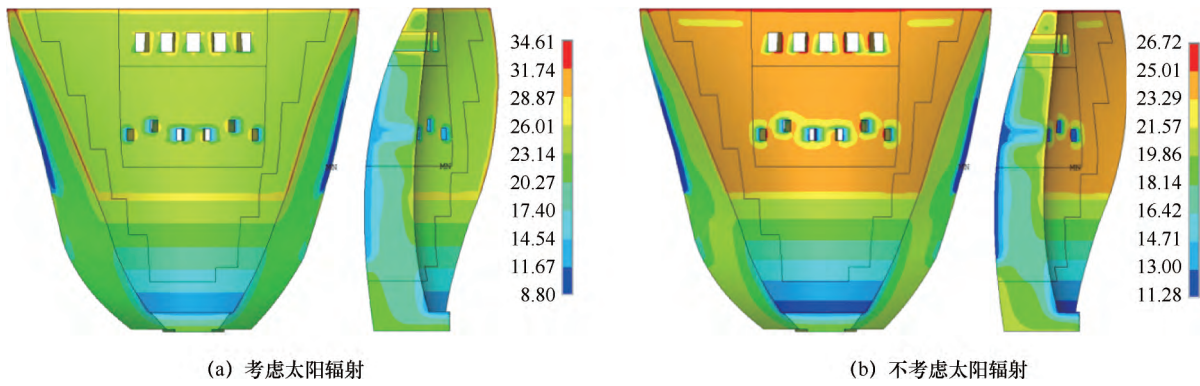


图 6 2021 年 7 月下游坝面及中心截面温度云图(单位: °C)

Fig. 6 Temperature simulation of the downstream surface and central cross-section in July 2021 (Unit: °C)

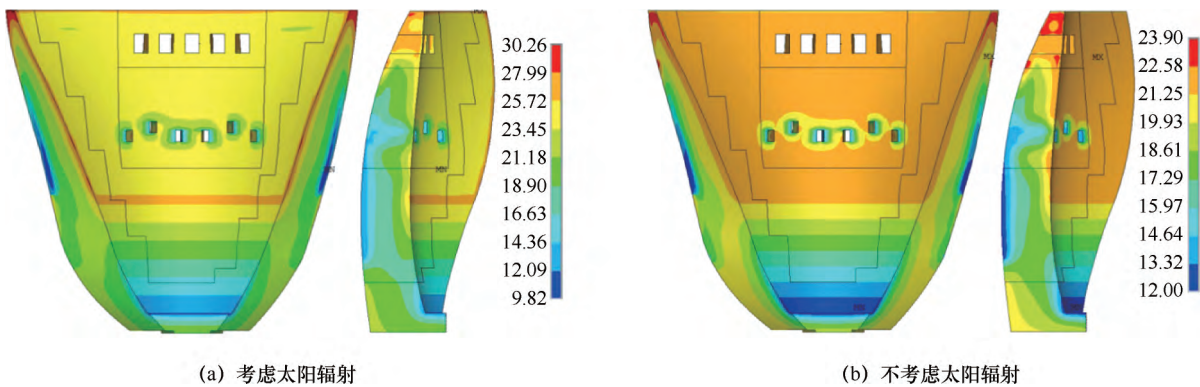


图 7 2021 年 11 月下游坝面及中心截面温度云图(单位: °C)

Fig. 7 Temperature simulation of the downstream surface and central cross-section in November 2021 (Unit: °C)

乌东德拱坝所处位置太阳辐射强度季节性变化明显。夏季太阳辐射对于拱坝混凝土下游表面温度的提升(3~4 °C) 大于冬季太阳辐射对于拱坝混凝土表面温度的提升(1~2 °C)。乌东德拱坝的东南朝向决定了拱坝下游左岸所受的太阳辐射强度高于右岸, 使得拱坝表面两侧温度分布出现差异, 而不考虑太阳辐射的模拟结果温度场则沿坝轴线向两侧对称分布, 也侧面验证了模型模拟的有效性。

选取上文对应典型时刻的拱坝第一主应力云图分析太阳辐射对拱坝混凝土温度应力的影响, 如图 8 和图 9 所示。拱坝在太阳辐射影响下整体的第一主应力有所提升且季节性强。考虑太阳辐射时拱坝表面第一主应力高于不考虑太阳辐射时第一主应力 0.5 MPa; 坝体中心截面第一主应力在考虑太阳辐射时比不考虑太阳辐射时大 0.4 MPa。夏季太阳辐射对坝面第一主应力的提升(0.7 MPa) 强于冬季(0.5 MPa)。遮蔽影

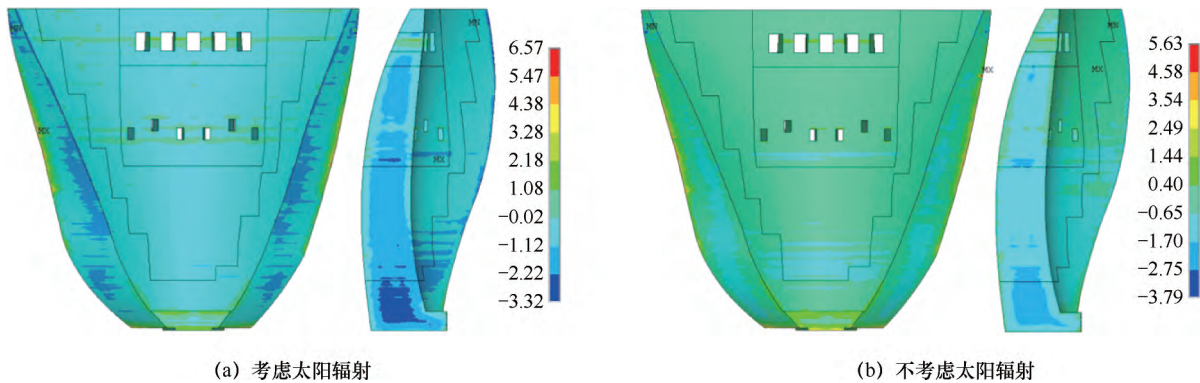


图 8 2021 年 7 月下游坝面及中心截面第一主应力云图(单位: MPa)

Fig. 8 Maximum principal stress on the downstream surface and central cross-section in July 2021 (Unit: MPa)

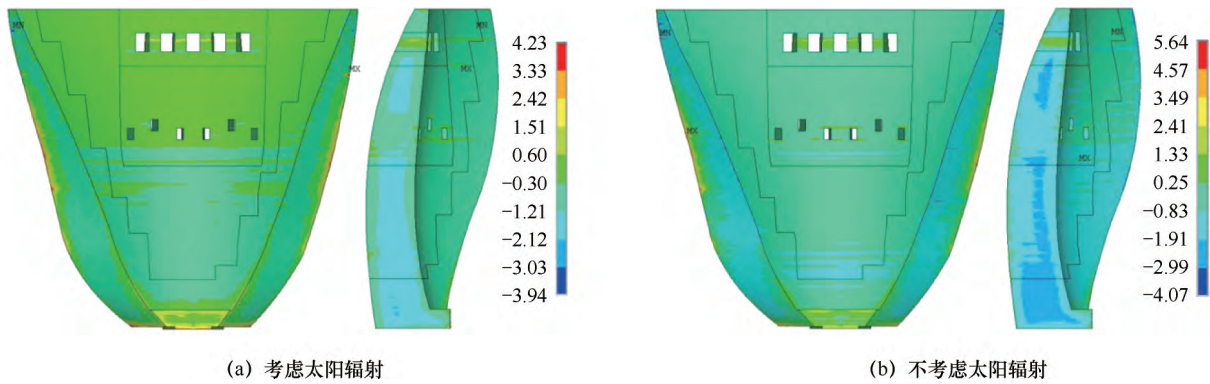


图9 2021年11月下游坝面及中心截面第一主应力云图(单位: MPa)

Fig. 9 Maximum principal stress on the downstream surface and central cross-section in November 2021 (Unit: MPa)

响下太阳辐射不均匀作用于坝面,使乌东德拱坝左右两侧的温度应力产生差异,下游左岸坝体温度、应力场整体高于右岸。

## 4 讨论

### 4.1 模拟结果验证与误差分析

与乌东德拱坝下游坝面高程 967 m 距离坝面 10 cm 的温度计实测结果比较,模拟得到温度趋势与乌东德实测数据相近,如图 10 所示,能够反映乌东德拱坝温度场的长期演化规律。拱坝监测获取的具体时刻温度受到短时环境因素影响较大,因此坝体温度的预测与实际值相比存在偏差。

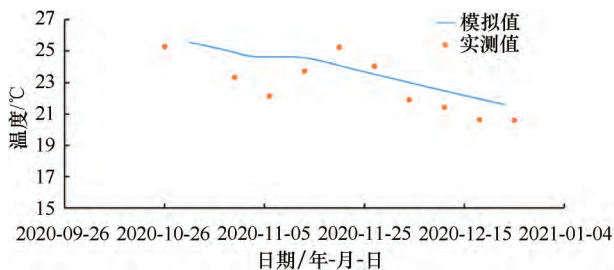


图10 模拟结果与实测对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of simulation results with field tests

一方面,在描述保温材料传热时采用线性化假设,基于现场监测反演无量纲系数  $k$  的取值。受客观条件限制,用于反演的温度监测数据的时间跨度要远小于本研究中的反演时段,短时监测数据的误差可能会在长期模拟过程中放大。另一方面,无量纲系数  $k$  涵盖了保温材料厚度、密度以及比热容等多参数信息,这些涉及保温材料物理属性的参数在大坝运行长期过程中可能因为外界或人为原因发生变化,进一步导致误差产生。一般而言,混凝土拱坝保温材料的施作厚度从 3~10 cm<sup>[23-24]</sup> 不等,对于如风化、局部

剥落等局部属性和状态的变化会比较敏感。为实现大坝长期太阳辐射影响评估,在监测温度的基础上,建议对保温材料的工作性态开展长期监测。

长期预测模型中使用了日平均和月平均数据,未能捕捉到更小时间尺度的温度变化信息。由于干热河谷环境特点,乌东德拱坝温度、应力场易受到如水库温度变化<sup>[25]</sup>、水汽蒸散发等实时变化环境的影响,精准预测短时坝体温度需引入更多因素才能取得理想结果。

### 4.2 太阳辐射长期防护方法

模拟结果表明,太阳辐射对于拱坝温度及应力场的影响主要有两个方面,一是拱坝坝面因吸收太阳辐射而产生整体性温升并在坝面附近产生较大的温度梯度;二是因地形、云量等遮蔽因素作用下抵达坝面的太阳辐射不均匀,坝面温度分布出现差异,诱发局部的温度应力集中。坝面施作保温措施对于大坝在高温或严寒区域的结构安全十分重要<sup>[26]</sup>。

在进行太阳辐射防护时需基于云量、地形和环境特点因地制宜。对于太阳辐射作用强烈、昼夜温度变化大的工程环境,重力坝可在设计过程中通过增加伸缩缝以释放温度应力,提高大坝适应性;拱坝则需施作保温措施进行防护。溪洛渡拱坝采用了聚苯乙烯保温板、聚乙烯保温卷材以及发泡聚氨酯 3 种保温材料开展差异化防护的探索<sup>[27]</sup>。针对遮蔽作用下太阳辐射引发的坝体温及应力场分布不均问题,可通过量化分析实际辐照分布差异,实施分区防护策略:在受到太阳辐射强度较高的坝面,优先选用高反射系数的保温材料进行覆盖,或通过增加保温材料厚度等方式强化防护效能,从而有效改善不同区域的热辐射吸收差异,实现坝体温度场的均衡调控。

在防护措施施作完成后,大坝运行期由于自然原因和人为因素,部分保温层仍会老化或者发生脱落,

失去防护功能<sup>[28]</sup>。因此,开展坝面保温层定期监测对于大坝长期无缝运行十分重要。NOUFID等<sup>[29]</sup>提出了基于红外热成像技术的保温板缺陷非接触检测方法,对坝面大面积快速保温材料缺陷识别做出了有益的探索。进一步地,乔俊明<sup>[30]</sup>通过在坝面铺设导电膜,实现坝面远程红外裂缝检测,同样可用于观测坝面保温层的完整性。根据拱坝结构的几何曲面特征及显著的高程跨度特性,人工检测方法需近距离接触坝体表面实施保温材料质量评估,该方式存在显著的安全隐患和技术局限性。未来可考虑引入无人机智能巡检系统等新型技术手段,突破传统检测方法在拱坝结构应用中的空间限制与安全瓶颈,推动大坝保温材料检测从单点抽样向全域数字化诊断升级。

#### 4.3 拱坝太阳辐射防护措施

为避免气温变化引发坝体内外温差增大,大坝坝面以铺设保温材料的方式进行保护,但是采用的保温材料则有所差异。南谷洞工程坝面采用了聚合物乳液涂料进行防护,夏季降低坝面最高温度约 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[31]</sup>;金桥水电站采用聚苯乙烯泡沫板应对越冬期的极端气温变化<sup>[32]</sup>;拉西瓦拱坝采用了挤塑聚苯乙烯减小了混凝土表面受到的外界气温影响约 $1\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[33]</sup>;石门子坝坝面喷涂聚氨酯保温材料,坝面冬季温度提升了约 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夏季温度下降了 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[24]</sup>。现有的保温材料种类繁多,选择合适的保温板材料来保证混凝土拱坝保温的整体质量和拱坝建设的经济性具有重要意义<sup>[34]</sup>。保温材料的选择需综合考虑保温性能、经济性、材料附着性以及现场施工条件等要素。水利工程中常用的保温材料包括保温被(橡塑海绵)、聚苯乙烯板和聚氨酯涂料3种,材料具体性能及工艺如表4所列。

表4 保温材料对比

Table 4 Insulation material comparison

名称	导热系数 $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	适用温度 $/^{\circ}\text{C}$	施工工艺	寿命/a
保温被	0.034~0.040	-40~105	手工包裹	10~15
聚苯乙烯板	0.028~0.035	-50~75	涂胶黏接	20~30
聚氨酯涂料	0.018~0.024	-50~120	现场喷涂	15~25

3种保温材料从适用温度和使用寿命上都能够很好地满足保温需求。保温被具有优异的柔韧性及低密度特性。然而,乌东德拱坝地处干热河谷区,太阳辐射强度高,橡塑海绵保温被长期暴露于紫外线下易发生粉化脱落。

聚苯乙烯板工艺简单,易施工,且经济性突出,

被大量用于三峡三期工程中,并取得了较为理想的效果<sup>[35]</sup>。

聚氨酯涂料与基材黏结力强,且抗风性能、保湿能力优异<sup>[36]</sup>,能够更好地抵抗干热河谷影响下的水分流失。此外,聚氨酯涂料的导热系数小,适用于强辐照环境。然而,聚氨酯涂料需现场喷涂成型,施工难度较大,且成本相对较高。

因此,经多方案比选论证,乌东德拱坝在受到强太阳辐射作用的上游面采用喷涂 $3\text{ cm}$ 的聚氨酯涂料保温,保证保温防护效果;下游面则采用 $3\text{ cm}$ 的挤塑式聚苯乙烯板保温,满足防护需求的基础上提升经济效益。乌东德拱坝施作的保温措施有效减少了抵达坝面的辐射热通量,避免太阳辐射导致坝面混凝土开裂,具有较好的参考价值。

## 5 结论

本文基于乌东德拱坝工程,通过遮蔽作用下的太阳辐射等效计算方法,开展太阳辐射对特高拱坝混凝土温度场和应力场影响研究,并与实际监测数据比较论证了方法的准确性,分析了太阳辐射对拱坝混凝土温控防裂的影响,并针对太阳辐射影响特点提出了防护建议,主要结论如下。

(1)提出了考虑区域云量、局部地形以及坝面保温材料等多种遮蔽作用的坝面太阳辐射计算方法。将区域云量和局部地形的影响等效为环境温度增量,不同坝面保温材料采用等效放热系数模拟,能够对太阳辐射长期作用下的拱坝温度场和应力场的演化趋势进行比较准确的预测。

(2)太阳辐射提升了乌东德拱坝表面及内部温度与应力,时空分布差异明显。结果表明太阳辐射导致拱坝表面最大拉应力增大约 $0.5\text{ MPa}$ ,温度最大升高 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;拱坝中心截面最大拉应力增大 $0.4\text{ MPa}$ ,温度最大升高 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。太阳辐射对拱坝温度与应力影响呈非对称性,下游左岸坝体温度、应力场均高于右岸,最大拉应力差异约 $0.4\text{ MPa}$ 。

(3)开展太阳辐射防护时,需依据地形特征与环境条件实施差异化设计。通过实施分区防护策略应对遮蔽作用导致的坝面辐照分布差异,实现坝体温度场的均衡调控。乌东德拱坝根据气温及太阳辐射强度分布特点,采用上下游坝面差异化防护设计,有效减少了抵达坝面的辐射热通量,避免坝面混凝土开裂,为同类工程中太阳辐射防护设计提供了宝贵的经验。

### 参考文献(References):

[1] 林鹏,李庆斌,周绍武,等.大体积混凝土通水冷却智能温度控

- 制方法与系统[J]. 水利学报, 2013, 44( 8): 950-957.
- LIN P, LI Q B, ZHOU S W, et al. Intelligent cooling control method and system for mass concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44( 8): 950-957.
- [2] 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, 37( 12): 1424-1432.
- ZHU B F. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37( 12): 1424-1432.
- [3] 薛刚, 孟煜童, 白纬宇. 大跨度混凝土连续箱梁桥运营阶段的温度场分析[J]. 工程力学, 2017, 34( S1): 116-121.
- XUE Gang, MENG Yutong, BAI Weiyu. Analysis of temperature field of long-span concrete continuous box girder bridge during operation [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34( S1): 116-121.
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- ZHU B F. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [5] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar Engineering of Thermal Processes[M]. New Jersey: Wiley, 2013.
- [6] BALKEMA A A. Deterioration of Dams and Reservoirs: Examples and Their Analysis [M]. Rotterdam; Boston: published for ICOLD., 1984.
- [7] BALLIVY G, BENMOKRANE B, CHAALLAL O. Déformations générées dans les bétons sous l' influence des conditions climatiques [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1991, 18( 6): 1088-1092.
- [8] MAKEN D D, LÉGER P, ROTH S N. Seasonal thermal cracking of concrete dams in northern regions [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28( 4): 04014014.
- [9] JIANG H F, ZHENG D J, WU X, et al. Stacking BSRG-PLS: A physical and data-driven real-time stability safety analysis of arch dams during operation [J]. Structures, 2024, 70: 107615.
- [10] 许继刚, 王振红. 高海拔地区碾压混凝土坝温控防裂研究[J]. 中国农村水利水电, 2019( 8): 162-167.
- XU J G, WANG Z H. Research on the temperature control and crack prevention of roller-compacted concrete dams during the construction period in high-altitude regions [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019( 8): 162-167.
- [11] MIRZABOZORG H, HARIRI-ARDEBILI M A, SHIRKHAN M. Impact of solar radiation on the uncoupled transient thermo-structural response of an arch dam [J]. Scientia Iranica Transaction A, Civil Engineering, 2015, 22( 4): 1435.
- [12] JIN F, CHEN Z, WANG J T, et al. Practical procedure for predicting non-uniform temperature on the exposed face of arch dams [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30( 14/15): 2146-2156.
- [13] SHEIBANY F, GHAEMIAN M. Effects of environmental action on thermal stress analysis of Karaj concrete arch dam [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132( 5): 532-544.
- [14] 陈拯. 太阳辐射对拱坝温度场的影响研究及其工程应用[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- CHEN Z. Effects of Solar Radiation on Thermal Analysis of Arch Dams and Engineering Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [15] 梁仁强. 干热河谷地区高拱坝温度控制与防裂研究[J]. 人民长江, 2014, 45( 17): 42-45.
- LIANG Renqiang. Study of thermal control and crack prevention for high arch dam in dry-hot valley region [J]. Yangtze River, 2014, 45( 17): 42-45.
- [16] 程复, 李婧, 常丹东, 等. 基于 GIS 的接坝山地太阳直接辐射空间分布规律研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31( 5): 196-199.
- CHENG F, LI J, CHANG D D, et al. Characterizing spatial distribution patterns of direct solar radiation in jieba mountain using GIS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31( 5): 196-199.
- [17] 邵晨飞, 许焱鑫, 田始光, 等. 太阳辐射影响下特高拱坝温度场及变形形态研究[J]. 华中科技大学学报( 自然科学版), 2023, 51( 10): 142-148.
- SHAO C F, XU Y X, TIAN S G, et al. Study on temperature field and deformation characteristic of super-high arch dam under influence of solar radiation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology ( Natural Science Edition), 2023, 51( 10): 142-148.
- [18] 王兴安, 梅飞鸣. 辐射传热[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- WANG X A, MEI F M. Radiative Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [19] 费焯, 夏祥鳌. 1980—2009 年中国大陆中东部气溶胶-云-辐射变化及其关系[J]. 气象与环境科学, 2016, 39( 2): 1-9.
- FEI Y, XIA X A. Decadal variations of aerosol-cloud-radiation in Eastern China and their relationships during 1980—2009 [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39( 2): 1-9.
- [20] KLUCHER T M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces [J]. Solar Energy, 1979, 23( 2): 111-114.
- [21] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- YAN Q S, ZHAO Q Z. Building Thermal Process [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986.
- [22] 国家气象信息中心. 中国地面气象观测历史数据集( 月值) [D]. 北京: 国家气象信息中心, 2023.
- National Meteorological Information Center. Historical Dataset of Conventional Surface Meteorological Observations in China ( Monthly) [D]. Beijing: National Meteorological Information Center, 2023.
- [23] 陈送财, 丁瑞勇. 基于发泡聚氨酯对大坝保温的研究[J]. 合肥工业大学学报( 自然科学版), 2009, 32( 5): 742-744.
- CHEN S C, DING R Y. Research on heat insulation of a dam based on foaming polycurethane [J]. Journal of Hefei University of Technology ( Natural Science), 2009, 32( 5): 742-744.
- [24] 李文伟, 江敏敏, 向欣, 等. 高寒地区低热水泥混凝土拱坝温控防裂方案[J]. 南水北调与水利科技( 中英文), 2024, 22( 5): 967-977.
- LI W W, JIANG M M, XIANG X, et al. Temperature control and crack prevention scheme of low heat cement concrete arch dam in high cold area [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22( 5): 967-977.
- [25] 王金贵. 金沙江典型水库水温影响因素敏感性分析[J]. 人民长

- 江, 2017, 48(7): 21-25.
- WANG J G. Sensitivity analysis of influential factors for water temperature of typical reservoirs in Jinsha River [J]. Yangtze River, 2017, 48(7): 21-25.
- [26] 姜琪, 李双洋, 赵建沅, 等. 基于 T-S 模糊故障树的寒区水库大坝冻害风险分析[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1): 165-177.
- JIANG Q, LI S Y, ZHAO J Y, et al. Frost damage risk analysis of reservoir dam in cold regions based on T-S fuzzy fault tree [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1): 165-177.
- [27] 樊启祥, 邬昆, 陈文夫. 溪洛渡特高拱坝混凝土保温技术研究与应用[J]. 水力发电学报, 2019, 38(4): 213-223.
- FAN Q X, WU K, CHEN W F. Study and application of superficial thermal insulation of Xiluodu super high arch dam concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(4): 213-223.
- [28] ZHANG X F, LI S Y, LI Y L, et al. Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(11): 939-943.
- [29] NOUFID A, BELATTAR S. Simulation of a defect in a concrete dam structure using steady-state infrared thermography [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 45(1): 187-196.
- [30] 乔俊明. 大坝心墙河床段基座混凝土裂缝的远程红外监测[J]. 无损检测, 2022, 44(10): 35-39.
- QIAO J M. Remote infrared monitoring for concrete crack in the base of the river bed section of dam core wall [J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 44(10): 35-39.
- [31] 岳跃真, 郝巨涛. 南谷洞水库沥青混凝土防渗斜墙的修补加固[J]. 中国水利, 2009(6): 65-66.
- YUE Yuezhen, HAO Jutao. Repair and reinforcement of the asphalt concrete impervious slope wall of Nangudong Reservoir [J]. China Water Resources, 2009(6): 65-66.
- [32] ZHANG Y X, PAN J W, SUN X J, et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions [J]. Engineering Structures, 2021, 230: 111721.
- [33] 崔金良, 邹良智, 高莉, 等. 拉西瓦拱坝中 XPS 板的保温保湿效果分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(6): 13-15.
- CUI J L, ZOU L Z, GAO L, et al. Analysis of heat and humidity preservation effects with extruded polystyrene insulation board in Laxiwa Concrete Arch Dam [J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2011, 29(6): 13-15.
- [34] LI G C, YANG J, CHENG L, et al. Research on the mechanical behavior law of local damage of insulation board during the operation period of high arch dams [J]. Structures, 2024, 68: 107216.
- [35] 齐建飞, 王忠友. 聚苯乙烯板在三峡大坝坝体保温中的应用[J]. 人民长江, 2009, 40(6): 27-28.
- QI J F, WANG Z Y. Research on application of PS boards in TGP dam temperature insulation [J]. Yangtze River, 2009, 40(6): 27-28.
- [36] 姜顺宏, 熊涛, 韦虎. 高海拔寒冷地区碾压混凝土筑坝保温材料比选及应用[J]. 水电与新能源, 2021(11): 70-75.
- JIANG S H, XIONG T, WEI H. Selection and application of the thermal insulation materials for roller compacted concrete dam in high altitude and cold area [J]. Hydropower and New Energy, 2021(11): 70-75.

(责任编辑 王璐)