

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. (in Chinese)

# 高寒地区低热水泥混凝土拱坝温控防裂方案

李文伟<sup>1</sup>, 江敏敏<sup>1</sup>, 向欣<sup>1</sup>, 欧阳金惠<sup>1</sup>, 周秋景<sup>2</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 高寒地区年平均气温低、昼夜温差大, 拱坝易产生温度裂缝, 从筑坝材料源头就降低温升, 可进一步降低拱坝开裂风险。开展中、低热水泥混凝土拱坝温度场、应力场的对比分析; 进行低热水泥混凝土拱坝温控措施优化比选; 形成适合高寒地区低热水泥混凝土拱坝的温控防裂方案。结果表明: 低热比中热水泥混凝土拱坝最高温度低 4.0 °C 左右, 应力最大值低 0.7 MPa 左右, 安全系数从 2.48 提升到 3.65; 低热水泥混凝土拱坝可放宽约束区冷却水管间距至 1.5 m×1.5 m, 强约束区浇筑层厚可从 1.5 m 放宽至 3.0 m, 坝体表面流水措施可取消, 夏季浇筑温度可放宽至 16.0 °C, 冬季实现常温浇筑; 脱离约束区, 高温季节 5—9 月浇筑温度可放宽至 18.0 °C, 层厚对大坝最高温度及应力影响较小, 因此可放宽至 6.0 m; 大坝采用全年永久保温, 等效放热系数取  $\beta \leq 3.05 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$ 。研究结果验证了低热水泥混凝土拱坝抗裂性能的优势, 给出高寒地区温控优化措施, 实现大坝快速施工, 进一步降低了温控和施工成本。

**关键词:** 低热水泥; 混凝土拱坝; 温度场; 应力场; 防裂方案

**中图分类号:** TV698; TU411 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0096

西藏地区水资源充沛<sup>[1-2]</sup>, 近年来我国在这一地区进行了大量的水资源开发<sup>[3]</sup>, 大坝建设也逐步向这一区域发展<sup>[4]</sup>。西藏地区处于高海拔、高纬度的西部高寒地区, 气候特点为年平均气温低、早晚气温变化大、太阳辐射强、日照时间长、气候干燥以及寒潮频发<sup>[5-6]</sup>, 在高寒地区筑坝容易出现裂缝, 如果坝体内部应力过大甚至会造成贯穿性裂缝<sup>[7]</sup>。针对高寒地区碾压混凝土重力坝越冬层保温问题的研究有: 李明超等<sup>[8]</sup>提出一种自发热形式的越冬层面导电混凝土, 可解决寒潮期坝体内外温差大的问题; 杨映等<sup>[9]</sup>研究提出即使大坝浇筑温度严重超标的情况, 在浇筑的初期以及冬季时严格做好大坝保温措施, 同时在蓄水之前做好裂缝的修补问题就能较好地防止后续运行时裂缝的进一步扩散。针对在高寒地区采用规范或者公式计算大坝允许温差的不准确性, 黄海达等<sup>[10]</sup>、孟宪磊等<sup>[11]</sup>分别综合考虑混凝土徐变、自生体积变形等因素后, 认为仿真计算结果可以更好预测混凝土的基础温差。

以上针对高寒地区筑坝开展的相关研究和各种温控防裂方案能有效降低该地区筑坝开裂的风险, 但仍有部分大坝由于温控防裂措施不当出现了一定的裂缝, 如: 1994 年 2—4 月, 辽宁本溪观音阁碾压混凝土坝在越冬层面的上下游产生水平裂缝, 裂缝最大深度达 3~6 m<sup>[12]</sup>; 2009 年 8 月中旬, 新疆某碾压混凝土坝因为寒潮来袭, 在没有进行临时保温措施的情况下产生 193 条裂缝<sup>[13]</sup>。国际上如: 日本本州岛玉川碾压混凝土坝前后几年都发生了数条长短不一的裂缝<sup>[14]</sup>; 奥地利某 200 m 高的拱坝, 施工期下游面发生裂缝; 俄罗斯高 242 m 的某重力拱坝, 施工期、运行期均发生大量的裂缝。上述案例说明, 在高寒区建设特高混凝土坝是一个世界难题。

综上所述, 在高寒地区研究大坝温控措施很有必要。研究表明, 目前特高拱坝(如乌东德、白鹤滩)混凝土采用常规的“中热硅酸盐水泥+35% I 级粉煤灰”方案, 在温控措施达到现有先进水平的情况下,

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-08-22 网络出版时间: 2024-09-06

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240905.1723.012>

基金项目: 三峡集团科研项目(NBZZ20220243); 国家自然科学基金重点项目(U2040222)

作者简介: 李文伟(1965—), 男, 湖南长沙人, 正高级工程师, 博士, 主要从事大坝新材料方面研究。E-mail: [li\\_wenwei@ctg.com.cn](mailto:li_wenwei@ctg.com.cn)

通信作者: 江敏敏(1989—), 男, 安徽安庆人, 高级工程师, 博士, 主要从事大坝温控防裂研究。E-mail: [jiang\\_minmin@ctg.com.cn](mailto:jiang_minmin@ctg.com.cn)

混凝土抗裂安全因数仅 1.8 左右, 预冷混凝土等温控环节稍有不慎就会导致温度超标致使坝体开裂<sup>[15-16]</sup>。考虑到在严寒地区建设高坝开裂的风险更大, 可以从材料的源头就降低混凝土的绝热温升, 低热水泥由于较中热水泥更低的水化热、更高的后期强度、更好的抗侵蚀性和耐磨性能等优越的材料性能在大体积混凝土中广泛应用<sup>[17-19]</sup>。李文伟等<sup>[20-21]</sup>研制了一种专门用于特高拱坝的低热水泥, 分析了低热水泥 4 种矿物成分的组成最佳比例, 提出了相应的技术标准, 建立了规模化的生产体系, 为特高拱坝全面应用低热水泥混凝土筑坝奠定了基础。王鹏飞等<sup>[22]</sup>就低热水泥早期强度低、在大坝主体工程中应用较少的情况开展仿真计算, 结果表明在采取相同温控措施下, 低热水泥混凝土安全因数比中热水泥混凝土大, 能较好应用于特高拱坝。林鹏等<sup>[23]</sup>开展了低热水泥碾压混凝土坝的智能通水研究, 研究表明在大坝分区使用智能通水 2.0 系统, 有效降低干热河谷大坝开裂的风险。牛运华等<sup>[24]</sup>研究了乌东德大坝采用中、低水泥筑坝的最高温度的控制方案、温控标准, 结果表明低热水泥能有效降低大坝最高温度, 温控措施能得到一定的简化。杜雷功等<sup>[25]</sup>开展了高寒地区 QBT 工程特高拱坝智能温控研究, 认为低热水泥及坝体全断面保温的采用可有效地降低温度应力, 控制裂缝的产生。佟名等<sup>[26]</sup>、杨春宝等<sup>[27]</sup>分别开展了高寒地区低热水泥的材料

性能研究和从施工经验的角度提出了温控防裂方案。

综上所述, 很多学者已经做了不少低热水泥混凝土坝的温控防裂研究, 也形成了较为成熟的温控防裂措施, 但是在高寒地区的温控方案研究目前仍然较少。本文重点研究低热水泥混凝土坝温度场和应力场的分布规律, 对比优化低热水泥混凝土坝浇筑温度、冷却水管布置、表面流水、施工速度、表面保温等温控措施。

## 1 研究区概况

西藏某工程规模为一等大(1)型工程, 水电站大坝为混凝土双曲拱坝, 坝顶高程 3 225 m, 最大坝高 268 m, 坝顶弧长 424.20 m, 顶宽 10 m, 拱冠坝段最大底宽 54 m, 共分 21 个坝段, 横缝间距 18~20 m, 其中泄洪坝段为 19 m, 采用坝身泄洪。电站初拟正常蓄水位 3 220 m, 正常蓄水位以下库容为 11.36 亿 m<sup>3</sup>, 调节库容 8.74 亿 m<sup>3</sup>, 电站初拟装机容量 108 万 kW, 多年平均发电量 40.25 亿 kW·h。

坝址区气候特点为冬春季气候寒冷、干燥少雨, 夏秋季空气湿润多雨, 年平均温度在 -1.0~9.0 °C, 各月平均气温 7 月最大, 1 月最小, 平均地温 10.9 °C, 平均风速约 1.1 m/s。坝址附近平均气温、地温见表 1。

表 1 坝址区多年月平均气温、地温

Tab. 1 Annual average monthly temperature and ground temperature in the dam site area

单位: °C

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	全年
气温	-1.0	1.1	4.0	7.3	10.8	13.9	15.6	15.2	13.0	8.3	3.0	-0.7	7.6
地温	1.0	4.1	8.0	11.3	14.8	17.9	19.6	19.2	17.0	12.3	6.0	1.3	11.0

## 2 数据与方法

### 2.1 计算工况

选取拱冠坝段计算, 按照夏季和冬季 2 种浇筑方案。浇筑仓厚度分前 7 仓层厚为 1.5 m, 后续各仓均为 3.0 m, 以及各仓均为 3.0、4.5、6.0 m 等方案。3 050 m 高程以下间歇时间为 7 d, 3 050 m 以上间歇时间为 10 d。初始方案(即工况 1)混凝土浇筑温度: 约束区高温季节 5—9 月控制浇筑温度 12.0 °C, 11 月—次年 3 月低温季节控制浇筑温度 8.0 °C, 4 月、10 月份取浇筑温度为 10.0 °C; 非约束区高温季节 5—9 月浇筑温度取 14.0 °C, 10 月—次年 4 月取自

然入仓温度。一期通水冷却: 冷却水温 6.0 °C, 通水时间 20 d, 通水流量为 1.2 m<sup>3</sup>/h, 冷却水管长度按 250 m 控制。中期通水冷却: 中期冷却按 9 m 灌区进行, 冷却水温 10.0 °C, 通水流量为 1.0 m<sup>3</sup>/h, 目标温度 14.0 °C。表面流水养护: 夏季 6—9 月浇筑混凝土在间歇期内采用天然河水进行表面流水养护冷却措施。坝面保温: 对于拱坝上下游面施工期为全年永久保温方式, 保温默认采用 5 cm 保温板, 等效热交换系数  $\beta \leq 3.05 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$ ; 冬季 11 月—次年 3 月浇筑混凝土浇筑完毕即对仓面及横缝面进行保温, 等效热交换系数与上下游面一致。其他工况在工况 1 的基础上优化调整, 见表 2。

表 2 计算工况

Tab. 2 Working condition of calculation

工况	开浇 时间/月	浇筑层厚/m	浇筑温度/℃	冷却水管间排距/m			表面 流水
				强约束区	弱约束区	自由区	
1	7	1.5、3.0	12.0	1.0×1.5	1.0×1.5	1.5×1.5	是
2	7	3.0	12.0	1.5×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5	/
3	7	3.0	14.0	1.5×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5	/
4	7	3.0	16.0	1.5×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5	/
5	7	1.5、3.0	14.0	1.0×1.5	1.0×1.5	1.5×1.5	是
6	7	1.5、3.0	16.0	1.0×1.5	1.0×1.5	1.5×1.5	是
7	7	1.5、3.0	18.0	1.0×1.5	1.0×1.5	1.5×1.5	是
8	7	1.5、3.0	20.0	1.0×1.5	1.0×1.5	1.5×1.5	是
9	12	3.0	6.0	1.0×1.5	1.0×1.5	1.5×1.5	/
10	12	3.0	8.0	1.5×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5	/
11	7	4.5	12.0	1.5×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5	/
12	7	6.0	12.0	1.5×1.5	1.5×1.5	1.5×1.5	/

## 2.2 计算模型

根据不稳定温度场热传导控制方程和弹性徐变理论<sup>[28]</sup>计算混凝土弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量和自生体积应变增量,依托中国水利水电科学研究院自主研发的结构多场仿真与非线性分析软件 SAPTIS<sup>[29]</sup>开展计算。有限元计算模型见图 1,坝段顺河向最大底宽为 54 m,横缝间距为 18 m。模型的整体网格单元数为 40 200,节点数为 50 787。图中顺河向为 X 方向,横河向为 Y 方向,竖向为 Z 方向。温度场计算基岩四周和底面为绝热边界条件,基岩顶面(建基面除外)为第 3 类边界条件;大坝上下游面施工期为第 3 类边界条件,蓄水后为第 1 类边界条件。上下游面考虑太阳辐射的作用,按气温加 3 ℃ 考虑。应力场计算基岩底面为三向约束,其余表面为自由边界。

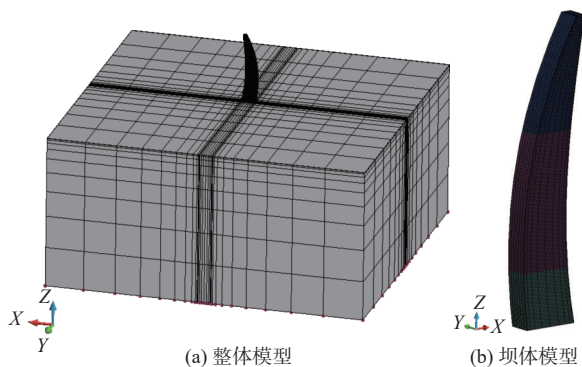


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

## 2.3 计算参数

中、低热水泥混凝土的导热系数  $\lambda$  分别为 8.2、7.6 kJ/(m·h·℃), 线膨胀系数  $a$  分别取  $9.5 \times 10^{-6}$ 、 $7.2 \times 10^{-6}$  /℃, 泊松比分别取 0.19、0.22。比热比分别取 0.95、0.90。基岩弹模取 28 GPa, 其他参数见表 3。

## 3 结果与分析

### 3.1 温度场、应力场对比

研究计算时长 2 年 8 个月,限于篇幅,仅给出大坝在中、低热水泥混凝土浇筑到第 1 个冬季和施工完成时的温度分布云图。从图 2、图 3 可知,中、低热水泥混凝土坝温度场分布规律类似,在最新浇筑仓的中心温度最高,随着水管通水冷却,温度逐渐降低,后续降到封拱温度 9.0 ℃。坝体上层混凝土浇筑之后,坝体上下层之间的温差较大,需要做好保温措施。低热比中热水泥混凝土坝最高温度低 4.0 ℃ 左右,和 2 种材料绝热温升最大值差值相一致。图 4 给出了 2 种材料的温度包络图,从图中可以看出包络图的分布规律基本一致,中、低热水泥混凝土坝最大值均出现在自由区高程 2 980.0 m 处,温度分别为 30.2、25.1 ℃,温度最大值相差 5.0 ℃ 左右。另外,中、低热水泥混凝土坝强约束区温度分别为 23.3、19.8 ℃,弱约束区分别为 26.9、22.1 ℃;温度差分别为 3.5、4.7 ℃。低热水泥混凝土坝最大温度值上相对于中热水泥混凝土坝有一定的优势。

表 3 中、低热水泥混凝土热力学参数

Tab. 3 Thermodynamic parameters of medium and low heat cement concrete

混凝土分区 混凝土强度等级		Ⅲ区 C18040W12F300				Ⅱ区 C18030W10F300				Ⅰ区 C18035W10F300			
龄期/d		7	28	90	180	7	28	90	180	7	28	90	180
弹性模量E/GPa	中热	18.0	21.4	26.0	28.0	16.0	19.0	23.0	25.0	17.0	20.0	24.0	26.0
	低热	23.2	30.1	35.8	39.2	22.1	28.7	34.1	38.3	22.1	28.7	34.1	38.3
极限拉伸值 $\epsilon/(\times 10^{-4})$	中热	1.02	1.15	1.25	1.35	0.95	1.05	1.15	1.25	1.00	1.10	1.20	1.30
	低热	0.60	0.85	0.97	1.04	0.52	0.82	0.95	1.00	0.52	0.82	0.95	1.00
允许抗裂应力/MPa	中热	0.92	1.23	1.63	1.89	0.90	1.10	1.30	1.56	0.85	1.10	1.44	1.69
	低热	0.70	1.27	1.74	2.04	0.58	1.18	1.62	1.92	0.58	1.18	1.62	1.92
绝热温升T/°C	中热	$T = \frac{30.75(\tau^{1.5} - 0.768)}{4.916 + \tau^{1.5}}$				$T = \frac{26.0(\tau^{1.5} - 0.768)}{4.916 + \tau^{1.5}}$				$T = \frac{28.0(\tau^{1.5} - 0.768)}{4.916 + \tau^{1.5}}$			
	低热	$T = \frac{24.5\tau}{2.46 + \tau}$				$T = \frac{21.7\tau}{2.96 + \tau}$				$T = \frac{21.7\tau}{2.96 + \tau}$			

注: 上述公式中 $\tau$ 为混凝土龄期。

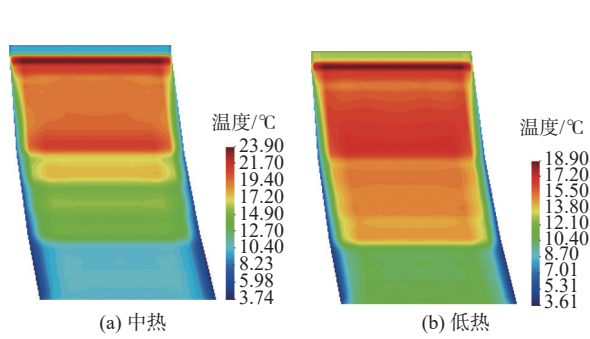


图 2 2023 年 1 月温度场

Fig. 2 Temperature field in January 2023

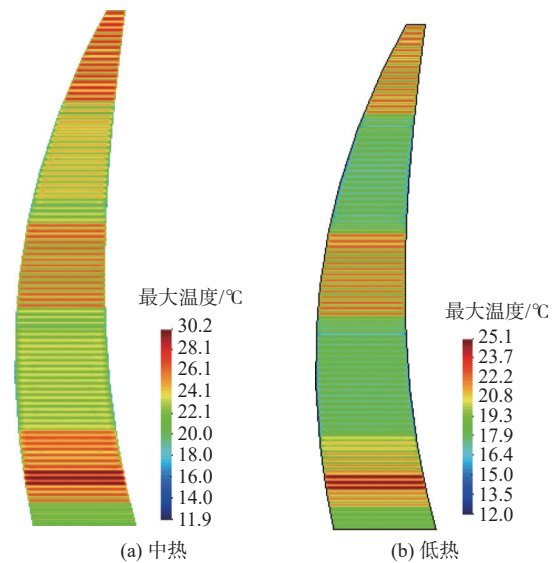


图 4 最大温度包络图

Fig. 4 Envelope diagram of maximum temperature

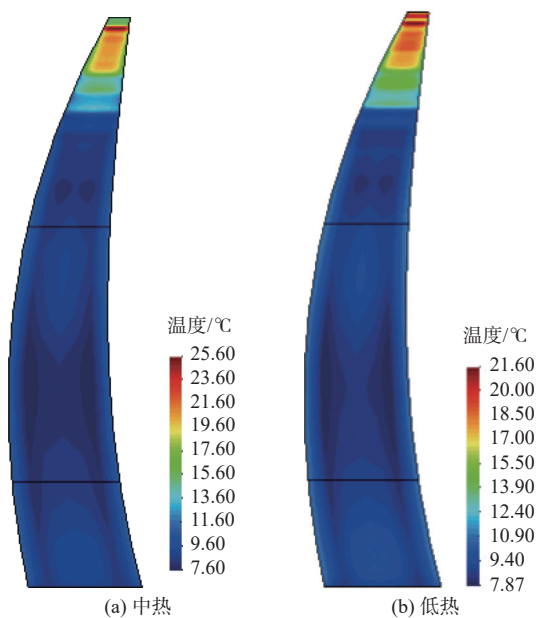


图 3 2024 年 9 月温度场

Fig. 3 Temperature field in September 2024

图 5 和图 6 给出了大坝第 1 个冬季和施工完成时的顺河向温度应力分布云图,由图 5 和图 6 可知:浇筑初期的冬季,坝体内部拉应力较小,随着浇筑的进行应力逐渐增大。坝体在 3 次通水冷却结束时应力达到最大值,中、低热坝分别约 1.52 MPa 和 0.98 MPa。坝体内部最大应力主要集中在强约束区靠近下游 4.0 m 深的位置,另外在自由区 3 055.0 m 高程附近也存在较大的拉应力,与温度场的分布规律对应。图 7 给出了大坝的温度应力包络图,从图 7 中可以看出包络图的分布规律基本一致,中、低热水泥混凝土坝最大值均出现在强约束区高程为 2 956.0 m 处,靠近基岩上方 1.0 m、下游面 4.0 m 左

右处,应力最大值分别为 1.64 MPa 和 1.11 MPa,安全因数为分别 2.48 和 3.63。中、低热水泥混凝土坝在自由区 2 980.0 m 高程处也出现了应力较大的区域,最大应力值在 1.53 MPa 和 1.54 MPa,2 种水泥材料筑坝温度应力值相当,但是低热水泥混凝土坝的安全因数仍然高不少,凸显低热水泥混凝土坝在抗裂性能方面的优势。

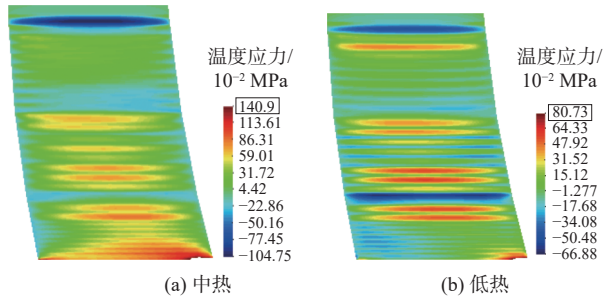


图 5 2023 年 1 月温度应力场

Fig. 5 Temperature stress field in January 2023

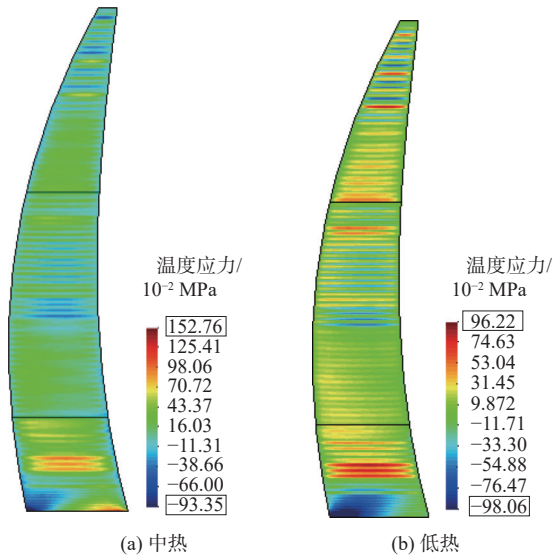


图 6 2024 年 9 月温度应力场

Fig. 6 Temperature stress field in September 2024

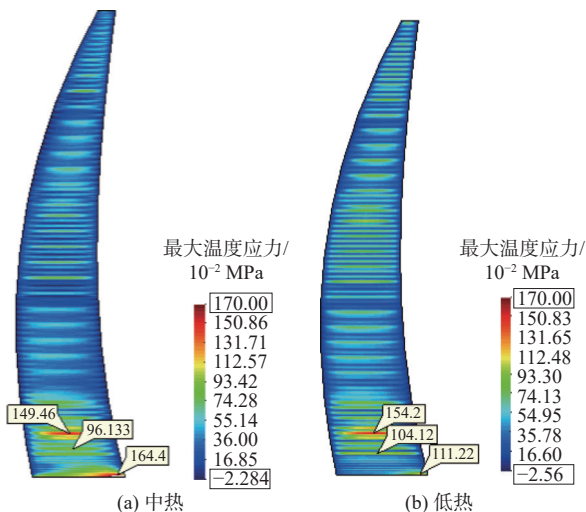


图 7 最大温度应力包络图

Fig. 7 Envelope diagram of maximum temperature stress

图 8 给出了第 1 仓第 1 灌区、第 4 仓第 2 灌区、第 7 仓第 3 灌区以及第 10 仓第 4 灌区 4 个不同高程关键点的温度及温度应力历程曲线可以看出:温度是在二冷末降到封拱温度,应力达到最大值,而后应力逐渐减小。中、低热水泥混凝土坝温度最大差值在 4.0~5.0 °C;浇筑到二冷末的时候应力达到最大值,在强约束区差值最大,达到 0.70 MPa,随着浇筑高程的增加,应力差值逐渐减小,在 2 983.0 m 高程处,应力差值不到 0.10 MPa,与前文的应力分布云图规律一致,不同中、低热材料筑坝主要是强约束区应力有差异。从历程曲线可以看出,在约束区低热水泥有明显的温度和应力富余空间,安全因数较高,可以进一步优化现有温控措施。

### 3.2 温控措施优化

根据第 2 节计算可知,低热水泥温度应力的富余度较大,可以进一步优化温控措施,本节从冷却水管的间距、骨料预冷和施工速度等方面进行温控方案的优化。

#### 3.2.1 放宽冷却水管间距

将约束区水管间距从 1.0 m×1.5 m 调整为 1.5 m×1.5 m,强约束区施工层厚从 1.5 m 提升到 3.0 m,取消表面流水,计算方案如表 2 中的工况 2。图 9 给出了坝体温度及温度应力包络图,图 10 给出了不同高程最大温度和应力关键点的温度历程曲线,由图 9 可知:坝体中横剖面强约束区温度 23.9 °C、弱约束区 24.0 °C、自由区 25.3 °C,基本接近中热水泥混凝土坝所选取的温度控制值。强约束区最大应力 1.78 MPa,出现在 2 956.0 m 高程处,相较于工况 1 的最大应力 1.11 MPa,应力提升 0.67 MPa,安全因数为 2.28。强约束区温度应力在二冷末达到最大值,最大应力值一直处于抗拉强度的范围内,而且还有一定的富余空间,坝体最高温度和最大允许应力仍然有一定的提升空间,但是在一冷末的时候温度应力接近允许值,后续要重点关注通水流量的大小。综上所述,在原有温控方案的基础上,可以加大冷却水管间距,另外,强约束区可以采取 3.0 m 的浇筑层,能更快速施工,坝体表面流水措施也可以取消。

#### 3.2.2 放宽浇筑温度

##### 3.2.2.1 夏季浇筑

考虑到工况 2 的温度、温度应力都还有优化的空间,另外如果是在冬季浇筑相关温控方案可能还有更一步优化的空间,本节逐一分析,计算工况见表 2 中工况 3、4。图 11 分别为中横剖面温度和温度应力包络图,图 12 给出了不同浇筑温度关键点温

度及温度应力历程曲线,从图 11 中可以看出:随着浇筑温度的提升,坝体最高温度也有一定的提升,在工况 2 的基础上,浇筑温度提升为 14.0℃、16.0℃,强约束区温度从 23.9℃ 提升到 25.4℃、26.8℃,弱约束区从 25.6℃ 提升到 27.0℃;应力最大的位

置出现在 2 956 m 高程处,最大应力从 1.97 MPa 上升到 2.02 MPa。温度每上升 2.0℃,应力上升 0.2 MPa 左右,安全系数从 2.20 下降到到 2.02,因此浇筑温度不建议超过 16.0℃,坝体最高温度按照 26.5℃ 控制。

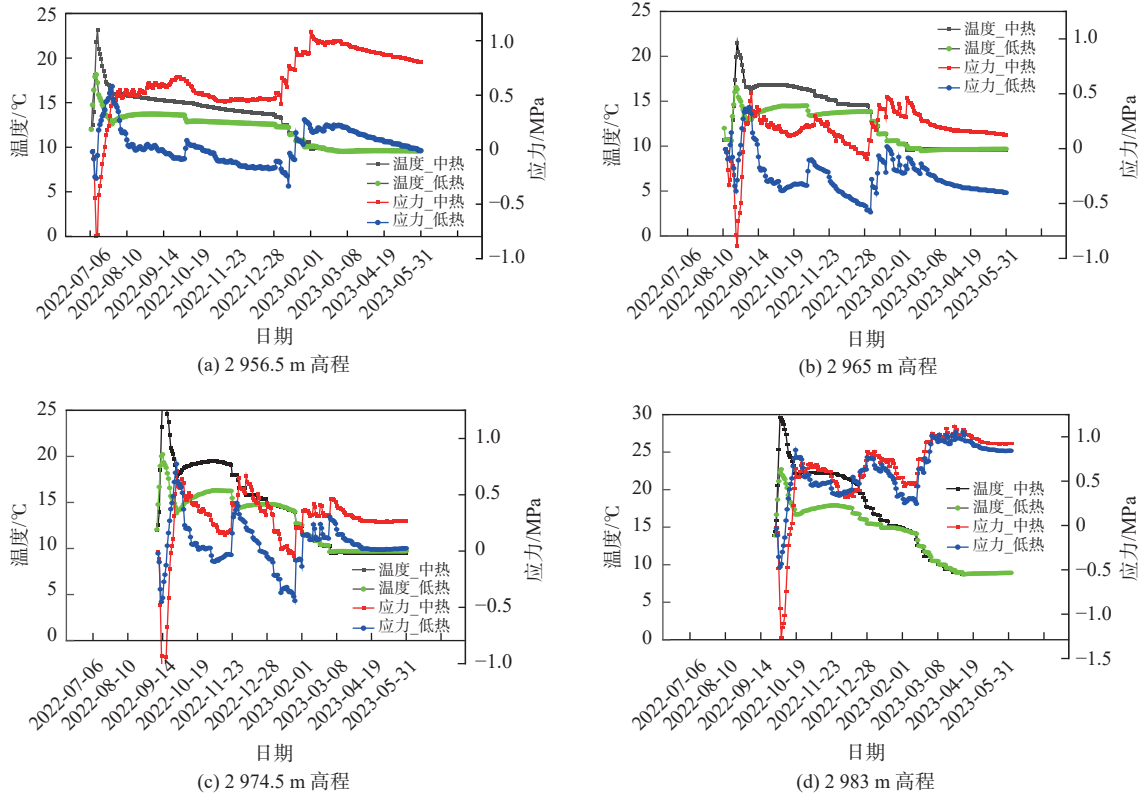


图 8 不同高程温度和温度应力关键点历程曲线

Fig. 8 Different elevation temperature and temperature stress key point history curve

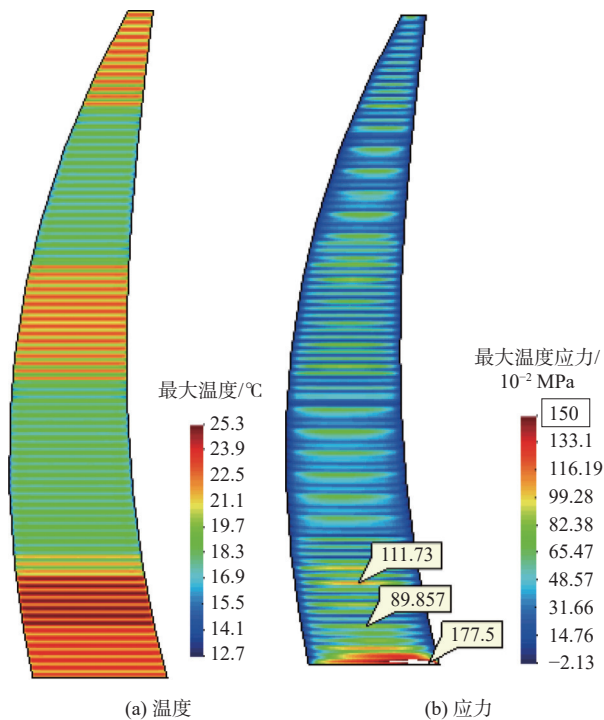


图 9 中横剖面温度和温度应力包络图

Fig. 9 Mid-section temperature and temperature stress envelope diagram

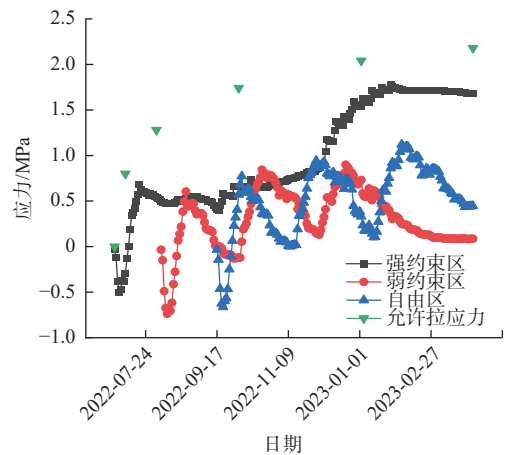


图 10 不同约束区最大应力点温度应力历程曲线

Fig. 10 Temperature stress history curves of maximum stress points in different constraint regions

### 3.2.2.2 冬季浇筑

计算工况见表 2 中的工况 9、10。从图 13 包络图中可以看出:工况 9 的温度场强、弱约束区温度均为 18.3℃、自由区为 23.3℃;工况 10 在工况 9 的浇筑基础上,浇筑温度放宽了 2.0℃,约束区的水

管间距从 1.0 m×1.5 m 放宽到 1.5 m×1.5 m; 工况 10 强、弱约束区温度为 21.2 °C、自由区 23.3 °C, 由于自由区水管间距、浇筑温度和气候没变化, 所以温度值一致; 工况 9 强约束区最大应力是 0.72 MPa, 出现在 2 956.5 m 高程, 弱约束区应力最大值为 0.73 MPa, 出现在 2 971.0 m 高程处; 工况 10 强约束区应力 1.14 MPa, 在 2 957.0 m 高程处, 弱约束区 0.95 MPa, 在 2 971.0 m 高程处, 从应力的角度, 仍然有较大的富余空间。在低热季节即使在减少水管间距和加快施工速度的前提下, 增加浇筑温度仍然满足浇筑要求, 可以尝试低温季节按照常温浇筑。

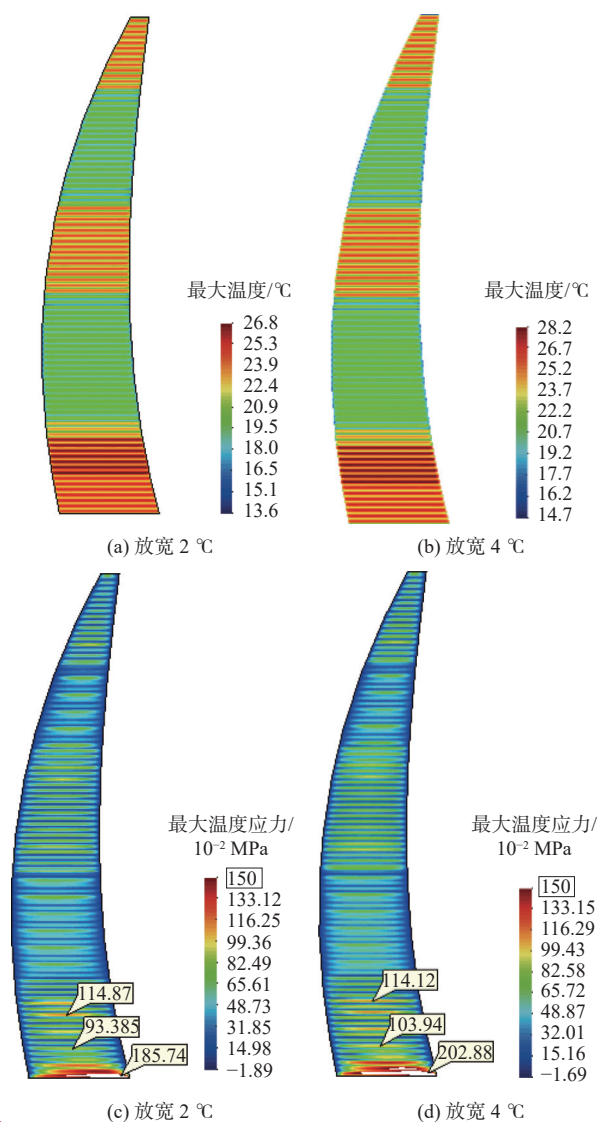


图 11 浇筑温度放宽后的温度、温度应力包络图

Fig. 11 Temperature and temperature stress envelope diagram after the pouring temperature is relaxed

### 3.2.3 快速施工

计算工况见表 2 中 11、12。图 14 给出了不同浇筑厚度的温度和温度应力包络图, 可以看出, 浇筑层厚从 3.0 m 提升到 4.5 m、6.0 m, 温度场分布规律

发生较大的变化, 强约束区温度分别为 23.4 °C (高程 2 959.0 m)、23.9 °C (高程 2 961.5 m)、24.0 °C (高程 2 963.5 m), 随着浇筑层厚的加厚, 温度场分别变化 0.5 °C、0.6 °C, 温度最大值区域随高程增加保持一致。图 15 和图 16 给出不同高程、不同层厚关键点应力曲线, 可以看出: 不同点的温度和应力由于施工层厚的不同, 达到相同温度和温度应力的时间不一样, 但是大小和规律都保持一致; 不同浇筑层厚度情况下, 坝段顺河向最大应力差别在 0.05 MPa 以内, 浇筑层厚对温度应力影响不明显; 不同层厚条件下, 最大顺河向应力出现在二冷末, 最大值均小于 2.04 MPa, 满足强度要求。在冷却措施和保温措施严格执行控制标准情况下, 浇筑层厚可灵活安排, 对最高温度及应力不会带来大的影响; 双曲拱坝施工进度受制于坝段最大悬臂高度、相邻坝段高差、最高坝段与最低坝段高差、接缝灌浆施工、仓面间歇期控制等影响因素调剂厚升层厚度。

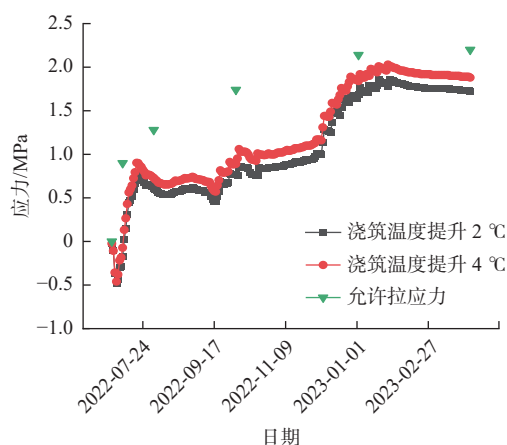
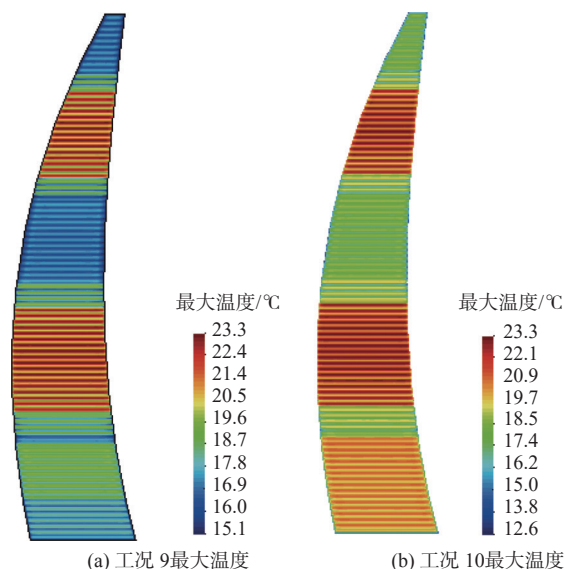


图 12 温度应力最大值点温度应力历程曲线

Fig. 12 Temperature stress history curve at the maximum point of temperature stress



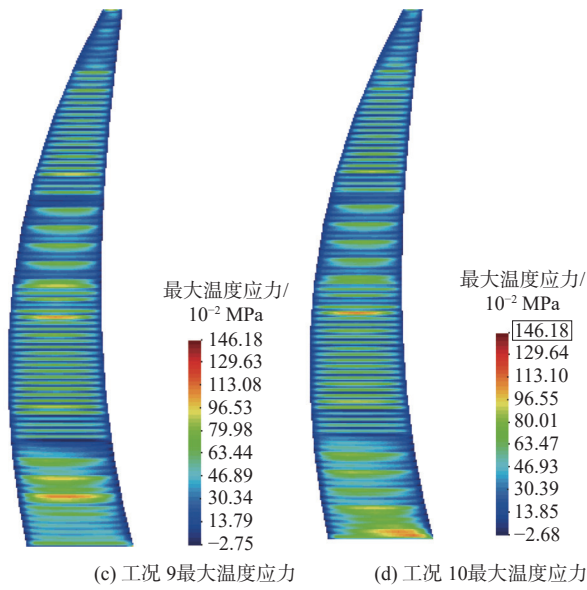


图 13 温度、温度应力包络图

Fig. 13 Temperature and temperature stress envelope diagram

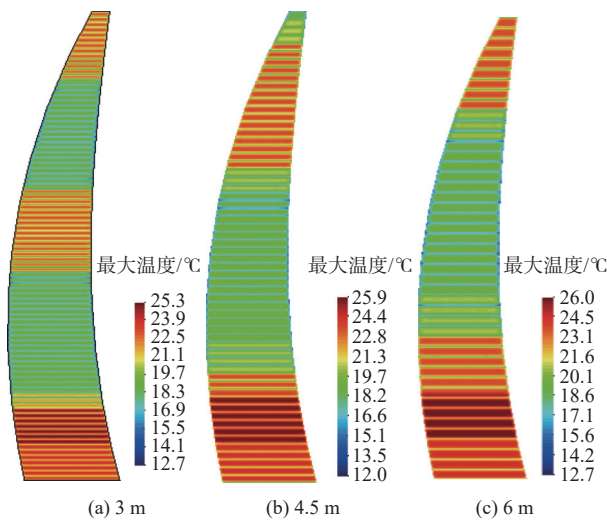


图 14 温度包络图

Fig. 14 Temperature envelope diagram

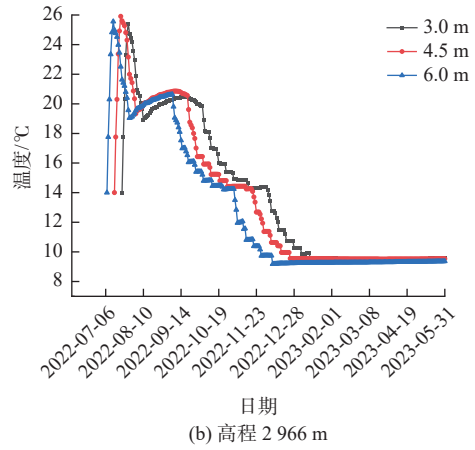
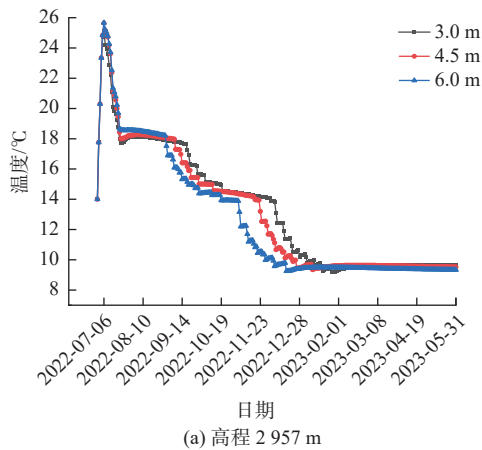


图 15 不同浇筑层厚、不同高程关键点温度历程曲线

Fig. 15 Temperature history curves of key points with different thickness of pouring layer and different elevation

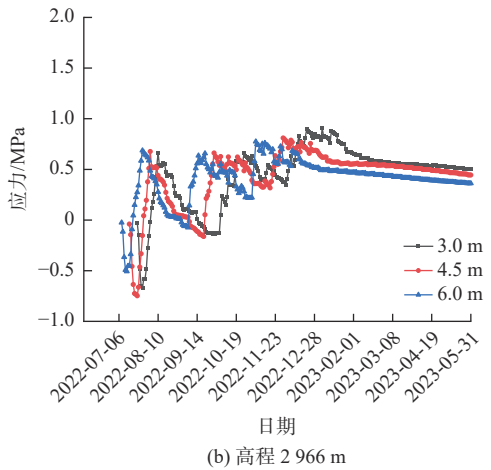
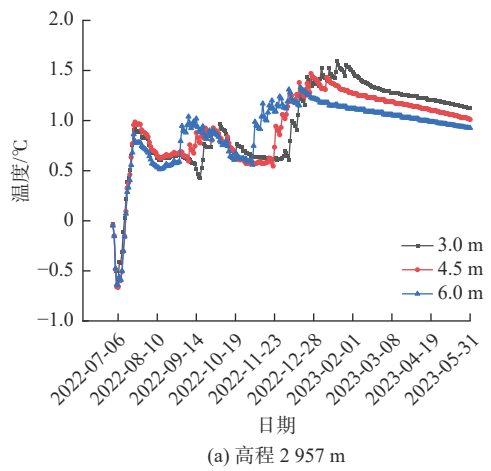


图 16 不同浇筑层厚、不同高程关键点温度应力历程曲线

Fig. 16 Temperature stress history curves of key points with different thickness of pouring layer and different elevation

#### 4 结论

为验证采用低热水泥筑坝温控防裂的优势及相应的温控措施,首先开展中、低热水泥混凝土坝温度场、应力场的对比分析,然后进行低热水泥混凝



土坝温控措施优化比选,最后形成适合高寒地区低热水泥混凝土坝的温控防裂方案,主要得出以下结论:

坝体内部最大应力主要集中在强约束区靠近下游 4.0 m 深的位置。在同等温控方案下,低热水泥混凝土坝最大温度相较于中热水泥混凝土坝低 4.0 ℃ 左右,应力低 0.50 MPa 左右,安全因数达到 3.60,安全因数高 1.10 左右,充分体现了低热水泥混凝土坝在抗裂性能方面的优势。

在放松水管间距 1.5 m×1.5 m、强约束区施工层厚加厚(3.0 m)及表面流水取消等温控措施的情况下,坝体强约束区最大温度为 23.3℃,强约束区应力最大为 1.78 MPa,安全因数为 2.28,相较于中热水泥混凝土坝,低热水泥混凝土坝温度应力仍然满足温控要求。

低热水泥混凝土坝强约束区最高温度可以放宽到 26.5 ℃,在水管间距 1.0 m×1.5 m、强约束区施工层厚为 1.5 m 时,夏季浇筑温度能放宽到 20.0 ℃;在水管间距 1.5 m×1.5 m、施工层厚为 3.0 m 时,夏季浇筑温度能放宽到 16.0 ℃,冬季实现常温浇筑。脱离约束区后,浇筑温度在满足内外温差及表面应力条件下,高温季节 5—9 月浇筑温度可适当抬高至 18.0 ℃,低温季节浇筑可实现常温浇筑。

浇筑层厚从 3.0 m、4.5 m 达到 6.0 m 的过程中,强约束区温度场分别变化 0.5 ℃、0.6 ℃,随着坝体高程的增加温度增量逐渐减小。应力的最大值仍然出现在基础强约束区,应力最大值 1.77 MPa 左右,即浇筑层厚对温度应力影响不明显,在冷却措施和保温措施严格执行控制标准情况下,浇筑层厚可灵活安排。

拱坝上下游面采用全年永久保温,混凝土浇筑完毕即保温,保温采用 5 cm 保温板,等效热交换系数  $\beta \leq 3.05 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃})$ ,冬季 11 月一次年 3 月需采用临时措施加强保温, $\beta \leq 1.0 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃})$ 。冬季 11 月一次年 3 月浇筑的混凝土,浇筑完毕即对仓面及横缝面进行保温,等效热交换系数与上下游面一致。

#### 参考文献:

[1] 雷峥琦,刘毅,朱振泱,等.高寒区混凝土坝长期运行安全监控预警方法[J].水利水电技术(中英文),2022,53(3):70-77. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.03.007.

[2] 王中根,巩同梁,黄滢,等.西藏水资源承载力调查研

究[M].北京:中国水利水电出版社,2020.

- [3] 刘毅,杜雷功,钱文勋,等.高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J].水利水电技术,2020,51(3):45-52. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.03.006.
- [4] 樊启祥,林鹏,魏鹏程,等.高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J].水利学报,2021,52(12):1404-1417. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210320.
- [5] 夏勇,刘毅,齐问坛,等.高海拔地区高拱坝首仓混凝土温度反演分析与温控措施优化[J].水利水电技术(中英文),2024,55(4):71-80. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.04.007.
- [6] 姚可夫,田始光,漆一宁,等.高海拔区特征环境驱动下混凝土坝服役性能研究进展[J].水利学报,2023,54(6):717-728. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20221013.
- [7] 李文伟,理查德·W.伯罗斯.混凝土开裂观察与思考[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [8] 李明超,邓根华,于立新,等.高寒地区 RCC 坝越冬层碾压式导电混凝土电阻率细观分析[J].水利学报,2022,53(6):712-721. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20211094.
- [9] 杨映,景霞娟,朱振泱.高寒地区混凝土坝高温峰值区域的温控防裂[J].水利水电技术(中英文),2021,52(8):17-26. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.003.
- [10] 黄达海,金毅勳,张润潇.高寒地区强约束区大体积混凝土基础容许温差的仿真计算[J].水电能源科学,2013,31(3):103-105. DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2013-03-028.
- [11] 孟宪磊,张自喜,张娟,等.高寒地区某大坝基础容许温差温控标准研究[J].水电能源科学,2017,35(5):85-87.
- [12] 黄淑萍,胡平,岳耀真.观音阁水库碾压混凝土大坝温度应力仿真计算研究[J].水力发电,1996(7):40-44. DOI:CNKI:SUN:SLFD.0.1996-07-011.
- [13] 刘涛,卢冰华.某混凝土重力坝裂缝分类及产生原因综述[J].水利水电技术,2011,42(7):48-51. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.07.019.
- [14] 何建村,夏世法,吴艳,等.寒冷地区碾压混凝土重力坝越冬结合面防裂措施及效果[J].水电能源科学,2013,31(8):92-95. DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2013-08-025.
- [15] 樊启祥,张超然,陈文斌,等.乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J].水力发电学报,2019,38(2):22-35. DOI: 10.11660/slfjdx.20190203.
- [16] 谭尧升,樊启祥,汪志林,等.白鹤滩特高拱坝智能建造技术与应用实践[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(7):694-704. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.005.
- [17] 樊启祥,李文伟,李新宇.低热硅酸盐水泥大坝混凝土施工关键技术研究[J].水力发电学报,2017,36

- (4): 11-17. DOI: [10.11660/slfdbx.20170402](https://doi.org/10.11660/slfdbx.20170402).
- [18] KIM S J, YANG K H, MOOM G D. Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and limestone powder[J]. *Materials*, 2015(8): 5847-5861. DOI: [10.3390/ma8095277](https://doi.org/10.3390/ma8095277).
- [19] BILLINGTON D P, JACKSON D C, MELOSI M V. The history of large federal dams: Planning, design, and construction in the era of big dams [R]. Denver Colorado, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2005.
- [20] 李文伟, 樊启祥, 李新宇, 等. 特高拱坝专用低热硅酸盐水泥研究与应用 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(3): 113-120. DOI: [CNKI:SUN:SFXB.0.2017-03-015](https://doi.org/CNKI:SUN:SFXB.0.2017-03-015).
- [21] 李文伟, 陈霞, 杨华全. 骨料对 MgO 混凝土开裂敏感性的影响研究 [J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1070-1075. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9629.2014.06.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2014.06.023).
- [22] 王鹏飞, 刘有志, 樊亦林, 等. 低热水泥混凝土在特高拱坝中应用的可行性分析 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(9): 191-198. DOI: [CNKI:SUN:SJWJ.0.2018-09-026](https://doi.org/CNKI:SUN:SJWJ.0.2018-09-026).
- [23] 林鹏, 李明, 刘科, 等. 低热水泥碾压混凝土坝适应性智能通水策略研究 [J]. *水利学报*, 2022, 53(9): 1028-1038. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20220168](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20220168).
- [24] 牛运华, 潘洪月, 习兰云, 等. 乌东德大坝低热水泥混凝土温控防裂效果研究 [J]. *水电能源科学*, 2020, 38(5): 98-100. DOI: [CNKI:SUN:SDNY.0.2020-05-024](https://doi.org/CNKI:SUN:SDNY.0.2020-05-024).
- [25] 杜雷功, 席燕林. 严寒强震区特高拱坝筑坝关键技术难题及应对措施 [J]. *水利水电技术*, 2017, 48(10): 10-17. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2017.10.002](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2017.10.002).
- [26] 佟名, 李双喜, 叶弯, 等. 低热硅酸盐水泥应用于高寒地区混凝土坝的性能研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2021, 35(4): 71-76. DOI: [10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.04.014](https://doi.org/10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.04.014).
- [27] 杨春宝, 韩小妹, 温州, 等. 高寒区混凝土坝温控设计标准和防裂措施优化研究 [J]. *水利规划与设计*, 2021(2): 96-99. DOI: [10.3969/j.issn.1672-2469.2021.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2469.2021.02.021).
- [28] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [29] 周秋景, 张国新. SAPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之二)[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(9): 39-43. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2013.09.018](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2013.09.018).

## Temperature control and crack prevention scheme of low heat cement concrete arch dam in high cold area

LI Wenwei<sup>1</sup>, JIANG Minmin<sup>1</sup>, XIANG Xin<sup>1</sup>, OUYANG Jinhui<sup>1</sup>, ZHOU Qiuqing<sup>2</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The frigid regions were characterized by low annual average temperatures and significant diurnal temperature variations, which made it prone for dams to develop temperature cracks. The conventional high concrete arch dams at that time utilized a mix of "moderate heat Portland cement with 35% Class I fly ash". Despite achieving the then-current advanced level of temperature control measures, the safety factor for concrete crack resistance remained at approximately 1.8. Consequently, it was imperative to conduct research on temperature control and crack prevention, starting from the very source of the materials. With the concrete double-curvature arch dam of a hydropower station in Xizang as its research backdrop, low-heat cement concrete was chosen as the dam-building material. By reducing the temperature rise from the source of the material, it aimed to further mitigate the risk of cracking.

Drawing upon the theories of unstable temperature and stress field calculations, a comparative analysis of the temperature and stress fields between moderate-heat and low-heat cement concrete arch dams was conducted, highlighting the advantages of using low-heat cement concrete for dam construction. Following this, it optimized and compared various temperature control measures for low-heat cement concrete arch dams, ultimately formulating a tailored temperature control and crack prevention strategy suitable for frigid regions.

The results indicated that the maximum temperature of the low-heat cement concrete arch dam was approximately 4.0°C lower than that of the medium-heat cement concrete dam, and the maximum stress was reduced

by about 0.7 MPa. Moreover, the safety factor was elevated from 2.48 to 3.65. For low-heat cement concrete arch dams, the spacing of water cooling pipes in the constrained zone could be relaxed to 1.5 m×1.5 m, and the thickness of the pouring layer in the strongly constrained zone could be increased from 1.5 m to 3.0 m. The water flow measures on the dam surface could be eliminated, and the pouring temperature in summer could be relaxed to 16.0 °C, allowing for normal temperature pouring in winter. Outside the constrained zone, during the high-temperature season from May to September, the pouring temperature could be appropriately increased to 18.0 °C. The thickness of the layer had a minor impact on the maximum temperature and stress of the dam, permitting an extension to 6 m. The dam adopted permanent thermal insulation throughout the year, with a equivalent heat release coefficient of  $\beta \leq 3.05 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$ . These research outcomes validated the superiority of low-heat cement concrete arch dams in crack resistance and provided optimized temperature control measures for frigid regions. They facilitated rapid dam construction while further reducing temperature control and construction costs, offering technical guidance for the application of low-heat cement in frigid regions.

**Key words:** low heat cement; arched concrete dam; temperature field; field of stress; crack prevention scheme

.....

(上接第 966 页)

monitoring and inspection frequency, adjusting equipment operation, and even shutting down for maintenance, to avoid accidents and ensure the safety of equipment and personnel.

By comparing the predictive performance of the proposed method with single task learning and the model without attention mechanism, it can be concluded that: Compared with traditional static PCA model prediction methods, the multi-task learning model can fully utilize the common features of historical data to predict changes in unit parameters, fully consider the correlation between different tasks, and improve the robustness of the prediction model. The introduction of attention mechanism enables the model to dynamically adjust the mapping weights based on the characteristics of unit operating parameters in new time periods, further improving the stability of the model and the accuracy of prediction. The results have important application value for safety monitoring and intelligent warning of pump unit operation in pumping stations.

**Key words:** trend prediction; water pump unit; multi-task learning; attention mechanism; condition monitoring; multilevel early warning