

夏勇, 杨家琦, 赵恒, 等. 高寒区堆石混凝土一体化厚层浇筑坝体温度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 202-213. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.016

XIA Yong, YANG Jiaqi, ZHAO Heng, et al. Study on temperature of rock-filled concrete dams under integrated thick-layer placement in high-altitude cold regions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 202-213. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.016

高寒区堆石混凝土一体化厚层浇筑坝体温度研究

夏勇¹, 杨家琦², 赵恒¹, 张喜龙³, 金峰²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司, 四川成都 610000; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 3. 四川西沐建信科技有限公司, 四川眉山 620511)

摘要:【目的】低水化热温升和施工速度快的堆石混凝土(Rock-Filled Concrete, RFC)筑坝技术契合了高寒区的筑坝需求, 针对其在高寒区建设过程中的仓内温度变化情况进行现场监测可为其在高寒区的设计建设提供基础资料与参考依据。【方法】为研究高寒区 RFC 坝在一体化厚层浇筑下的坝体温度变化与分布规律, 对叶巴滩二道坝(坝顶高程 2 730.0 m)的坝体温度展开了现场跟踪监测, 累计在 13 个施工仓面内布设了 83 个温度测点。【结果】结果显示: 抗冲耐磨层自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)的水化热温升均值为 24.77 °C, 显著高于坝体 RFC 的 10.94 °C; 当浇筑层厚增加 0.5 m 时, C25-RFC 的水化热温升均值的变化幅度仅为 0.02 °C, 而 C30-SCC 则从 24.33 °C 增加到 27.24 °C, 上升了近 3.0 °C; 堆石内部测点(30 cm 深)与堆石外部测点(5~15 cm)的入仓温度与水化热温升度数相差不大, 且会随时间推移逐渐趋于一致。【结论】结果表明: (1)在高寒区抗冲耐磨一体化通仓厚层浇筑的情况下, 坝体局部高温、高温梯度区一般会分布在上下游抗冲耐磨层表面; (2)浇筑层厚的适当增加, 对坝体 RFC 水化热温升幅度影响较小, 但对抗冲耐磨层 SCC 的影响较大; (3)当混凝土标号和浇筑层厚一定时, 抗冲耐磨层的水化热温升度数相对稳定, 可通过调整入仓温度来使其峰值温度满足设计要求。

关键词: 高寒区; 堆石混凝土; 一体化厚层浇筑; 坝体温度; 抗冲耐磨层; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.016

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV632; TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0202-12



Study on temperature of rock-filled concrete dams under integrated thick-layer placement in high-altitude cold regions

XIA Yong¹, YANG Jiaqi², ZHAO Heng¹, ZHANG Xilong³, JIN Feng²

(1. Yebatan Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Sichuan CimInfoTech

Co., Ltd., Meishan 620511, Sichuan, China)

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2025-01-13; 录用日期: 2025-02-12; 网络出版日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52039005)

作者简介: 夏勇(1984—), 男, 高级工程师, 总工, 硕士, 主要从事水利水电工程施工技术与管理工作。E-mail: 114771181@qq.com

通信作者: 赵恒(1992—), 男, 工程师, 副主任, 硕士, 主要从事水利水电工程管理、智能建造研究。E-mail: 330591594@qq.com

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

Abstract: [Objective] Rock-filled concrete (RFC), characterized by low hydration heat temperature rise and rapid construction speed, meets the dam construction requirements in high-altitude cold regions. On-site monitoring of temperature variations inside the lifts during the construction in high-altitude cold regions can provide basic data and references for its design and construction in such environments. [Methods] To investigate the temperature variations and distribution patterns of RFC dam regions under integrated thick-layer placement in high-altitude cold regions, on-site tracking and monitoring were conducted on the Yebatan secondary dam (crest elevation: 2 730.0 m), with a total of 83 temperature measurement points deployed across 13 construction lifts. [Results] The results showed that the average hydration heat temperature rise of the self-compacting concrete (SCC) in the erosion-resistant layer was 24.77 °C, significantly higher than the 10.94 °C of the RFC in the dam body. When the placement layer thickness increased by 0.5 m, the average hydration heat temperature rise of C25-RFC changed by only 0.02 °C, while that of C30-SCC increased from 24.33 °C to 27.24 °C, a rise of nearly 3.0 °C. The placement temperature and hydration heat temperature rise showed minimal differences between internal (30 cm deep) and external (5~15 cm) measurement points in rock-filled concrete, with values gradually converging over time. [Conclusion] The findings reveal that: (1) under integrated thick-layer placement of erosion-resistant layers in high-altitude cold regions, local high-temperature zones and steep temperature gradients are typically distributed on the upstream and downstream surfaces of these layers. (2) A moderate increase in placement layer thickness has little effect on the hydration heat temperature rise of the RFC dam body but has a significant effect on the SCC in the erosion-resistant layers. (3) When the concrete grade and placement layer thickness remain constant, the hydration heat temperature rise of the erosion-resistant layers is relatively stable, and the peak temperature can be controlled by adjusting the placement temperature to meet design requirements.

Keywords: high-altitude cold region; rock-filled concrete; integrated thick-layer placement; dam body temperature; erosion-resistant layer; influencing factors

0 引言

随着我国水利工程的向西向高发展,高海拔寒冷地区混凝土坝的高质量快速建设成为了业界关注的重点问题^[1-3]。高海拔寒冷地区具有极端低温、超大温差、强辐射、全年可施工时间短^[4]等特点。因此,大坝的温控防裂与快速建设成为了高寒区混凝土坝建设的关键问题。堆石混凝土(Rock-Filled Concrete, RFC)是一项我国自主研发的新型筑坝技术^[5-9],具有低水化热温升、施工效率高、工艺简单以及低碳环保等优势^[10-13],契合了高寒区混凝土坝的建设需求,正逐步成为高寒区混凝土坝的优先选择方案。例如,满坪(坝高 77 m,坝顶高程 2 540.8 m)、晓龙沟(坝高 44 m,坝顶高程 3 956 m)、曲卜藏(坝高 38.5 m,坝顶高程 3 348.5 m)、金桥(坝高 26 m,坝顶高程 3 427.5 m)、叶巴滩二道坝(坝高 51 m,坝顶高程 2 730.0 m)等工程均采用了堆石混凝土作为大坝的主体结构。

相较于常态混凝土,由于仓内大量堆石(约占 55%)的引入,大体积 RFC 在低水化热温升及抗裂性能等方面具有明显优势^[6-15]。金峰等^[16]、余舜尧等^[17]、徐小蓉等^[18-20]、何涛洪等^[21]围绕绿塘、石坝河、龙洞湾及风光水库等展开了大量现场温度监测工作,实测结果表明,RFC 的水化热温升分布在 5~12 °C 之间,显著低于同标号的常态混凝土和碾压混凝土。HE 等^[22]、罗滔等^[23-24]、黄河啸^[25]及李玉

洁^[26]等针对 RFC 的断裂性能与破坏机理进行了研究,指出 RFC 的断裂破坏主要发生在岩块与自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)的交界面,RFC 的起裂韧度略小于 SCC,但失稳韧度大于 SCC;断裂路径的复杂性在一定程度上抑制了裂纹在 RFC 内部的发育。在施工效率方面,由于取消了碾压、振捣及冷却水管布设等复杂措施,RFC 坝相较于常态混凝土坝有明显优势,与碾压混凝土坝相当。近年来,为进一步提升堆石混凝土施工效率,依托工程实践提出了抗冲耐磨一体化浇筑、不分横缝的通仓浇筑以及厚层浇筑等快速施工方法。抗冲耐磨一体化浇筑是指将抗冲耐磨层与坝体堆石混凝土一体浇筑成形的快速施工方法,减少了模板的支立和拆卸工序,大幅提升了复杂结构堆石混凝土坝的施工速度,在东庄二道坝^[27]、叶巴滩二道坝^[28]等工程中取得了应用;通仓浇筑充分利用了堆石混凝土低水化热的特点,不设横缝,简化坝体构造,充分发挥其在大仓面施工上的速度优势,例如绿塘、龙洞湾、风光、沙千水库等^[11,17,29];厚层浇筑则是指突破堆石混凝土常规浇筑层厚 1.5~2.0 m 的限制,采用 2.0 m 以上的浇筑层厚,提升大坝整体的施工效率,例如,北京冬奥会延庆赛区塘坝(58 m)采用了 3 m 超厚层 RFC 浇筑工艺,仅 4 个月时间浇筑到顶^[30]。上述研究表明,堆石混凝土具有良好的温控防裂性能,抗冲耐磨一体化施工、通仓厚层浇筑等工法则进一步提升了其在施工速度方面的优势,证明了其在高海拔寒冷地区大坝

建设中应用的优势与潜力。然而, RFC 作为一种新型筑坝技术, 其在复杂条件筑坝与高坝建设等方面的理论基础与实践经验与常态混凝土等技术相比尚需做进一步的研究与验证。例如, 当前尚缺乏针对高海拔寒冷地区堆石混凝土坝温度的现场监测和分析。由于堆石混凝土完全取消了冷却水管等复杂温控措施, 其在高海拔寒冷地区的极端环境以及上述快速施工方法联合作用的条件下: (1) 是否存在局部温度梯度过高和表层开裂风险; (2) 仓内温度分布规律如何; (3) 如何进行有效的温控防裂等问题成为了亟待回答的关键议题。尽管赵厚然等^[28]、刘强等^[31]通过有限元仿真分析对上述问题进行了初步探讨, 但由于缺乏现场实测温度资料, 其相关结论的有效性尚待进一步验证。

基于此, 本文对金沙江上游高海拔寒冷地区的叶巴滩堆石混凝土二道坝施工期的坝体温度进行了全程跟踪监测与研究, 截止到 2024 年 8 月底, 已累计在 13 个典型施工仓面内布设了 83 个温度测点。在现场实测数据的基础上, 对抗冲耐磨层混凝土与堆石混凝土在施工期的温度指标进行了统计分析, 研究了抗冲耐磨层与堆石表面等高温度梯度风险区的温度变化与分布规律, 给出了后续施工过程中的温控措施与建议。本文研究结果可为高寒区 RFC 坝的研究与建设提供基础资料与参考依据。

1 现场温度监测方法

1.1 工程概况

叶巴滩堆石混凝土二道坝(以下简称“二道坝”)

地处高海拔寒冷地区, 位于四川与西藏交界处的金沙江上游河段上, 最大坝高 51 m, 坝顶高程 2 730.0 m。为抵抗水流侵蚀与冲刷, 二道坝采用“金包银”形式, 上、下游面设置 C30 抗冲耐磨 HSCC 作为抗冲耐磨层, 坝体中部采用堆石混凝土(见图 1)。

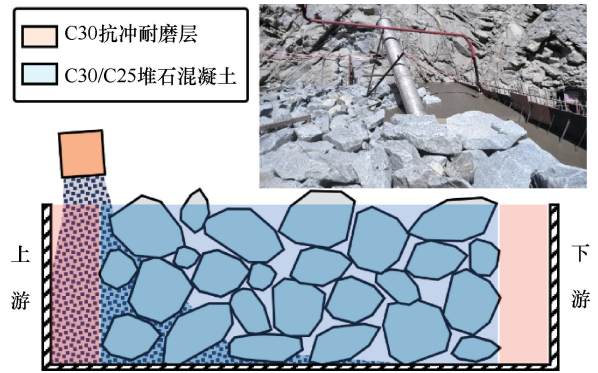


图 1 叶巴滩二道坝抗冲耐磨一体化浇筑过程

Fig. 1 Integrated placement process of erosion-resistant layer in Yebatan secondary dam

为提升大坝施工效率, 匹配叶巴滩水电站的整体工程进度, 经论证, 二道坝将采用抗冲耐磨一体化浇筑方法进行施工(见图 1); 根据监测结果分析, 通仓浇筑堆石混凝土开裂风险不高, 因此 2 688.0 m 高程以后采用了通仓浇筑, 但在抗冲耐磨部位保留设置了短; 达到 2 694.0 m 后浇筑层厚由 2 m 改为 2.5 m, 坝体堆石混凝土标号从 C25 改为 C30。

1.2 现场温度监测设备与方法

现场大坝温度监测设备与方法如图 2 所示。仓内布设在抗冲耐磨层、堆石空隙以及堆石内部的温度传

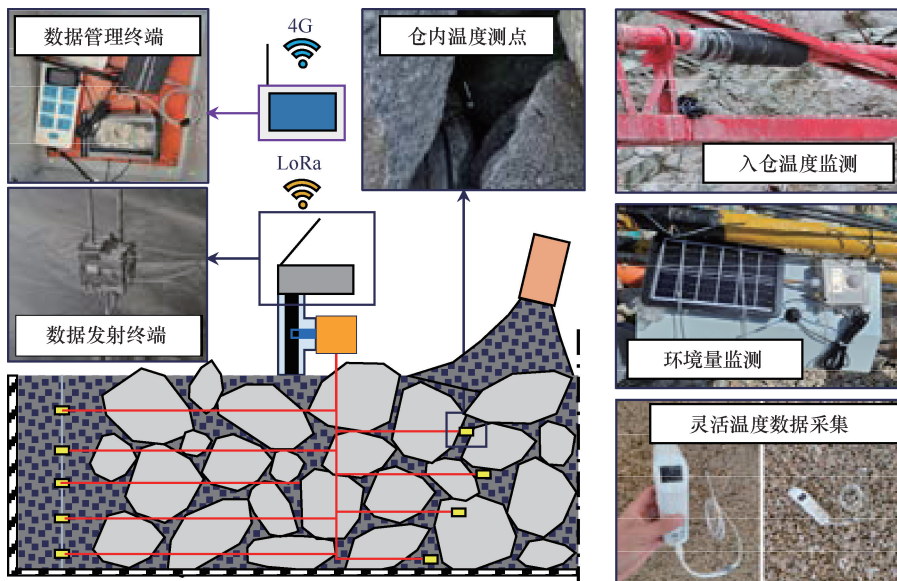


图 2 现场温度监测设备与方法

Fig. 2 On-site temperature monitoring devices and methods

感器用以监测坝体混凝土的温度变化情况; 布设在布料机泵管外侧的贴片式温度计用以监测混凝土的入仓温度; 布设在仓面附近的环境量监测装置用以监测环境温度、湿度及光照强度等环境量; 采集到的温度数据将通过工区自组 LoRa 网发送至数据管理终端, 再由其通过 4 G 网络上传至服务器数据库进行归档。便携式红外温度测量枪主要用于原材料温度、混凝土出机口温度及堆石表面等温度数据的灵活采集。

1.3 坝体温度测点布设

截止到 2024 年 8 月底, 累计对二道坝 13 个典型施工仓面的坝体混凝土进行了温度监测, 累计布设温度测点 83 个, 单个施工仓面温度测点的布设数量为 4~14 个不等, 采样频率 1 min/次。对于常规施工仓面, 应在抗冲耐磨层、坝体堆石混凝土中间部位各设

1 个测点作为代表性测点, 另需补充布设 2 个测点用以候补或监测特殊结构部位; 对于夏季炎热时段、施工方案调整、配合比调整等情况下的典型仓面则需对测点进行加密以反映坝体结构内的温度分布与变化规律。坝体温度测点的总体布设情况如图 3 所示。

需要说明的是, 叶巴滩二道坝 2023 年 10 月份开工, 至 2024 年 10 月份完工; 叶巴滩参建各方综合考虑人员、成本与工期, 决定优先保证主坝施工进度, 二道坝于 2023 年 11 月中旬—2024 年 3 月底冬歇停工, 因而, 本文未能监测到二道坝在极端低温环境下施工仓面的温度变化情况。冬歇停工期间, 二道坝仓面与上下游采用 5 cm 厚的聚乙烯卷材进行保温覆盖(见图 4); 次年 4 月初复工时, 对仓面及上下游表面进行复查未发现裂缝。

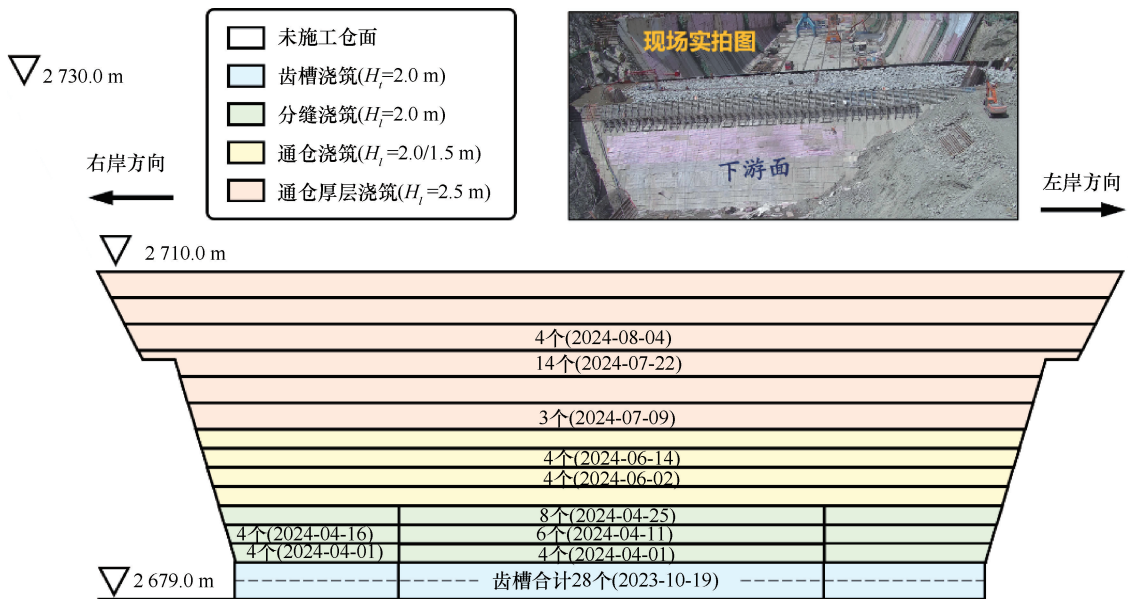


图 3 二道坝温度测点的布设情况

Fig. 3 Layout of temperature measurement points in secondary dam



(a) 施工仓面的保温措施

(b) 上下游表面的保温措施

图 4 二道坝冬歇停工期间的保温措施

Fig. 4 Insulation measures for the secondary dam during winter shutdown period in secondary dam

2 坝体温度监测指标分析

对抗冲耐磨层(SCC)和坝体堆石混凝土(RFC)代表性温度计监测数据进行统计可得,2024年6月—8月期间施工的SCC峰值温度与水化热温升均值分别为48.53℃和24.77℃,远大于同期RFC的31.95℃和10.94℃;而SCC与RFC的入仓温度均值则仅相差2.75℃。上述监测结果验证了RFC在低水化热温升方面的特性。

由图5可知,RFC入仓温度随时间呈现出现季节性变化的特点;峰值温度与入仓温度表现出较强的相关性,其本质是RFC水化热温升幅度变化相对较小。图6则显示SCC的入仓温度变化幅度较小,这是由于其时间跨度较小,环境条件变化不明显导致的;SCC水化热温升出现了小幅变化,可能是由于浇筑层厚的改变导致的。

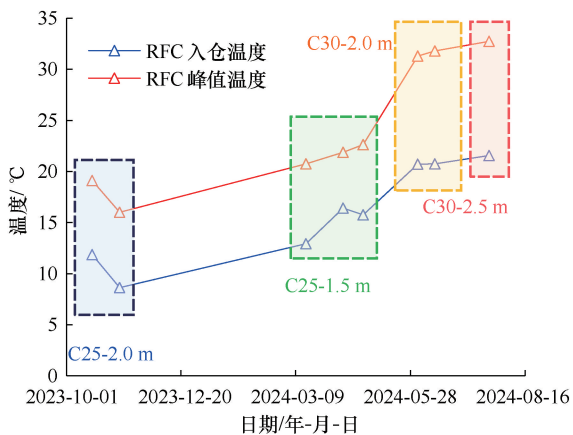


图5 堆石混凝土(RFC)代表性测点的温度指标变化

Fig. 5 Variation of temperature indicators at representative measurement points of RFC

对不同混凝土在不同浇筑层厚和标号下的水化热温升度数进行分析可知(见图6),SCC的水化热温升度数显著大于RFC,C30-SCC在2.0 m和2.5 m层厚时的水化热温升均值分别为24.33℃和27.47℃,比对应条件下的C30-RFC分别高13.72℃和17.28℃。而混凝土标号的上升则会引起水化热温升的小幅上升,C30-RFC在2.0 m层厚时的水化热温升均值为10.61℃,略高于C25-RFC的7.78℃。

进一步对比同类型混凝土在不同厚度下的水化热温升差异发现(见图7),当浇筑层厚增加0.5 m时,C25-RFC的水化热温升均值的变化幅度仅为0.02℃,C30-RFC降低了0.65℃,而C30-SCC则从24.33℃增加到27.24℃,上升了近3.0℃。这说明C25-RFC

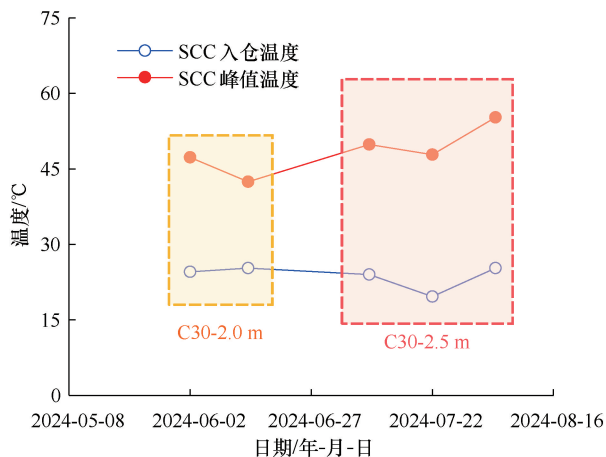


图6 抗冲耐磨层代表性测点的温度指标变化

Fig. 6 Variation of temperature indicators at representative measurement points of erosion-resistant layer

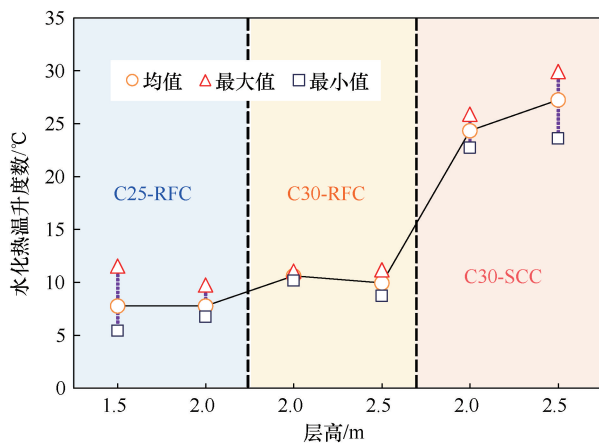


图7 不同混凝土类型与浇筑层厚下的水化热温升

Fig. 7 Hydration heat temperature rise under different concrete types and placement layer thicknesses

和C30-RFC的水化热温升幅度在浇筑层厚适当增加后无显著变化,而C30-SCC则会受浇筑层厚增加的显著影响。这可能是由于抗冲耐磨层SCC中无大块石中和温度,层厚增加带来的水化热累积作用较为明显导致的。因此,在厚层浇筑的情况下,应将抗冲耐磨层作为温控防裂的重点关注区域。

由前述分析可知,当混凝土标号和浇筑层厚一定时,抗冲耐磨层的水化热温升度数相对稳定,根据入仓温度即可初步确定峰值温度的基本范围。同样地,工程实践中可通过调整抗冲耐磨层混凝土入仓温度来使其峰值温度满足设计要求,抵消部分一体化厚层浇筑带来的影响。降低入仓温度对于控制坝体温度的有效性在东庄二道坝的建设过程中得到了验证(见图8)。

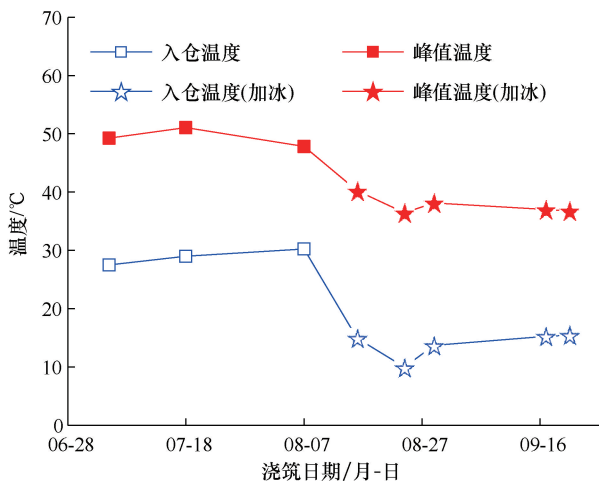


图8 东庄二道坝高温季节采用加冰拌合前后的温度指标对比

Fig.8 Comparison of temperature indicators before and after ice mixing during high-temperature seasons in Dongzhuang secondary dam

3 高风险部位的温度监测数据分析

由前节分析可知,高寒区抗冲耐磨一体化厚层通仓浇筑的情况下,抗冲耐磨层将形成局部高温区;此外,由于堆石混凝土的非均质性以及 SCC-块石界面的存在,堆石表面附近也可能会形成高温梯度区和开裂高风险区,因此,本节将对上述两类典型区域的温度监测数据进行深入分析。

3.1 抗冲耐磨层的温度变化规律分析

所选分析仓面高程为 2 703.8~2 706.3 m,抗冲耐磨层为 C30-SCC,坝体混凝土为 C30-RFC,浇筑层厚为 2.5 m,为抗冲耐磨一体化通仓厚层浇筑仓面。该仓面于 2024 年 8 月 04 日 00:00 至 07 日 21:00 浇筑完成,累计浇筑时长约为 91 h。浇筑期间环境温度的均值、最大值和最小值分别为 22.51 °C、43.02 °C 和 11.31 °C,属于工程所在地的夏季最为炎热的时段之一。

施工仓面高程 2 703.8~2 706.3 m 内温度测点的布设情况如图 9 和图 10 所示,共计 4 个温度测点,沿上下游线性布设在仓面中部,其中 1—3 号测点 (SCC-1、SCC-2、SCC-3) 位于 C30 抗冲耐磨层中,

4 号测点 (RFC-4) 位于坝体 C30 堆石混凝土与抗冲耐磨层交界面处。仓内各测点埋设位置与监测到的温度指标如表 1 所列。

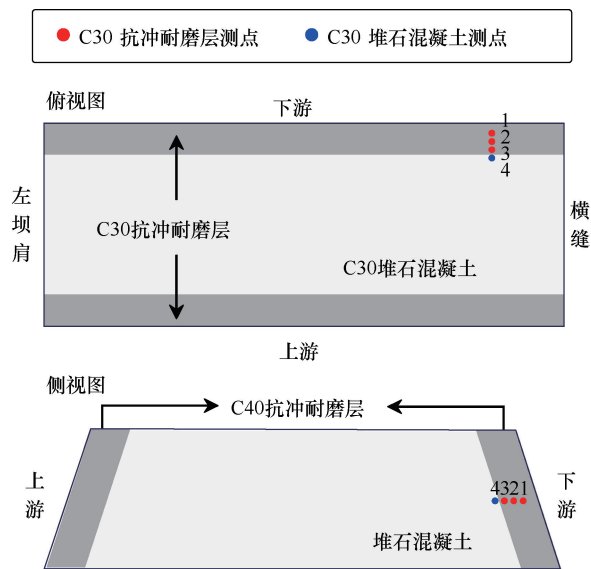


图9 高程 2 703.8~2 706.3 m 的温度测点分布

Fig.9 Distribution of temperature measurement points at EL2 703.8~2 706.3 m

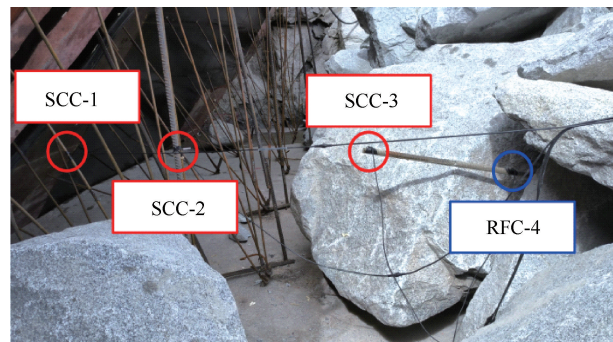


图10 高程 2 703.8~2 706.3 m 温度测点的实拍

Fig.10 Photos of temperature measurement points at EL2 703.8~2 706.3 m

由表 1 可知,仓内抗冲耐磨层代表性测点 (SCC-2) 测得的入仓温度、峰值温度和水化热温升度分别为 25.31 °C、55.25 °C 和 29.94 °C; RFC 测点 (RFC-4) 靠近交界面附近,受抗冲耐磨层温度影响

表 1 高程 2 703.8~2 706.3 m 的温度测点位置与指标汇总

Table 1 Locations and indicators of temperature measurement points at EL2 703.8~2 706.3 m

序号	监测类型	监测部位	仓面左侧距离/m	上游面距离/m	距底部高度/m	入仓温度/°C	峰值温度/°C	达峰时间/h	最大水化热温升/°C	最大温升速率/°C·h ⁻¹
1	SCC	中部	85.0	27.0	1.10	25.25	52.12	55.00	26.87	2.08
2	SCC*	中部	85.0	26.6	1.10	25.31	55.25	68.00	29.94	1.96
3	SCC	交界面	85.0	26.0	1.10	25.25	52.12	96.00	26.87	1.86
4	RFC	交界面	85.0	25.5	1.10	21.82	45.18	178.00	23.36	0.87

较大,无法作为 RFC 代表性测点与 SCC-2 进行比较。

仓内各测点温度随时间的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知,温度测点在被混凝土埋没后会出现突然上升,抗冲耐磨层 SCC 测点温度上升幅度较大,RFC 测点则因为周围有堆石体存在,上升幅度明显小于 SCC。SCC 测点的温升速率为 $1.86\sim 2.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,显著高于 RFC 测点的 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。SCC 测点峰值温度的最高点出现在抗冲耐磨层中部,靠近上游侧的测点温度在达峰后受环境温度影响会快速下降,靠近内侧的测点则会不断上升,最终将超过中间位置的代表性温度计。

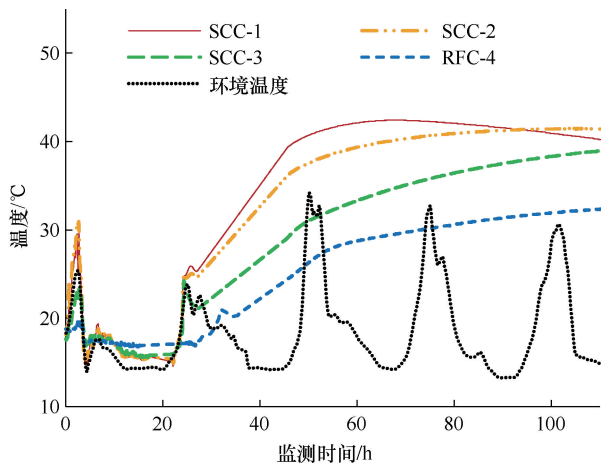


图 11 高程 2 703.8~2 706.3 m 测点的温度变化曲线
Fig. 11 Temperature variation curves of measurement points at EL2 703.8~2 706.3 m

进一步地,将测点 SCC-1、SCC-2、SCC-3 及 RFC-4 的温度变化曲线绘制到一起可以得到抗冲耐磨层中部温度的时空变化曲面(见图 12)。由图 12 可知,抗冲耐磨层测点在接触混凝土后的初期(40 h 以内),中部测点 SCC-1 的温度最高,而后最高温度逐渐向内转移(SCC-2);在 100 h 以后,交界面处测点(SCC-3)温度将超过 SCC-2;跨过 SCC-RFC 交界面后,测点温度将受堆石体的显著影响而保持较低水平。

根据图 12 不难看出,抗冲耐磨层中间部位虽然温度较高但温度梯度相对较小,其更可能在上游表面和与 RFC 的交界面附近产生较大温度梯度;考虑到 RFC 本身温度普遍高于环境温度,因此,抗冲耐磨层内的高温梯度区更容易产生在上下游表面附近。

在冬季温度骤降时,抗冲耐磨层表面温度梯度会进一步加大,进而带来表层开裂的风险。陆子铭等^[27]基于对东庄二道坝的温度应力分析结果建议在

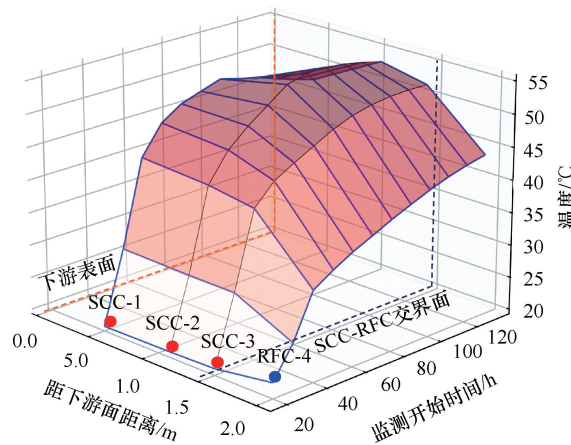


图 12 高程 2 703.8~2 706.3 m 测点温度的时空变化曲面
Fig. 12 Temporal and spatial variation surface of temperatures of measurement points at EL2 703.8~2 706.3 m

冬季施工时可对抗冲耐磨层加设保温措施,以降低表层开裂风险;赵厚然等^[28]则验证了表面保温措施的有效性:表面保温措施不会影响施工期坝体的最高温度,但可以有效改善抗冲耐磨层表层的拉应力状况。因此,适当的表面保温覆盖能够有效降低抗冲耐磨层的开裂风险;刘强等^[31]指出在 10 月到次年 2 月期间在坝体上下游表面及浇筑仓面采取保温养护措施,能够有效降低抗冲耐磨混凝土表面的拉应力,使其在应力允许值范围内。

3.2 堆石内外部的温度变化规律分析

所选分析仓面高程为 2 701.3~2 703.8 m,抗冲耐磨层为 C30-SCC,坝体混凝土为 C30-RFC,浇筑层厚为 2.5 m,同为抗冲耐磨一体化通仓厚层浇筑仓面。该仓面于 2024 年 7 月 22 日 01:00 至 7 月 28 日 18:00 浇筑完成(期间因故中断浇筑 1 次,实际总浇筑时长约为 96 h)。浇筑期间环境温度的均值、最大值和最小值分别为 $18.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $33.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为对堆石内外部温度及其温度梯度进行监测分析,在仓面高程 2 701.3~2 703.8 m 内共布设了 4 组堆石内外部温度测点,2 组测点(G1 和 G2)布设在抗冲耐磨层交界面处,2 组测点(G3 和 G4)布设在坝体 RFC 内部,其在仓内的布设情况如图 13 和图 14 所示。抗冲耐磨层交界面堆石测组共包含 4 根温度计,3 根埋设在堆石内部(深 30 cm、15 cm 和 0 cm),1 根距孔口水平 15 cm;坝体 RFC 内部堆石测组共包含 3 根温度计,2 根埋设在堆石内部(深 30 cm 和 0 cm),1 根埋设在块石附近的堆石空隙中(距孔口约 10 cm)。仓内各测点埋设位置与监测到的温度指标如表 2 所列。

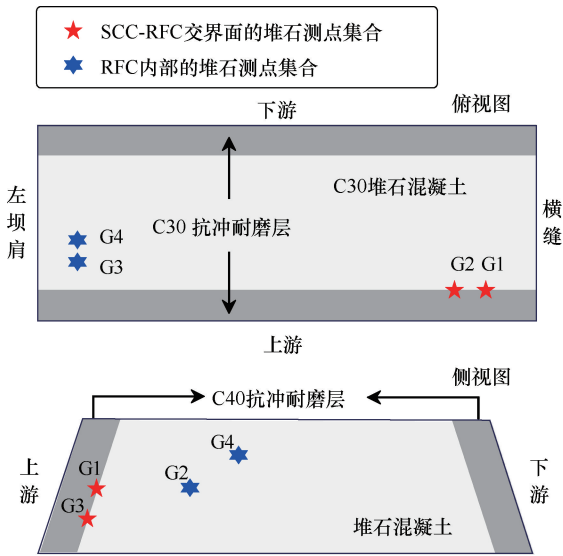


图 13 高程 2 701.3~2 703.8 m 测点温度的时空变化曲面
Fig. 13 Temporal and spatial variation surface of temperatures of measurement points at EL2 701.3~2 703.8 m

由表 2 可知, 抗冲耐磨层内测点 (SCC-4 和 SCC-8) 的峰值温度和水化热温升均值分别为 47.71 °C 和 25.90 °C, 远大于堆石空隙测点 (RFC-11 和 RFC-14) 的 31.84 °C 和 9.97 °C; 块石内部测点的温度指标与附近外部测点相近。

不同测点集合的温度监测结果如图 15 所示。由图 15 可知, 相同类型的测点集合的温度监测结果和变化规律是相近的, 证明了监测结果的可靠性。堆石内部测点的温度总小于内部, 但随着堆石与周围 SCC 的热交换过程, 堆石内外部温度将逐渐趋于一致。堆石内外部测点在未被浇筑前, 温度大小均趋于环境温度; 当堆石外部测点被入仓温度高于环境温度的 SCC 埋设后, 其温度将出现陡然上升, 随后与周围堆石体进行快速换热, 逐渐降低向周围堆石的温度逼近; 而堆石内部测点则因为块石的包裹, 其温度变化呈现出一定的滞后性, 逐步增大但无显著波动; 在最初的热交换结束后 (2~4 h), 堆石内外部温度将基本趋于一致。在随后的水化热温升阶段中, SCC-RFC 交界面处的测点集合 (G1 和 G2) 与 RFC 内部的测点集合 (G3 和 G4) 间呈现出不同的变化规律。RFC 内部测点集合中, 堆石内部与外部温度在水化热温升阶段相差较小, G3 与 G4 的内外部温差始终不超过 1.5 °C; SCC-RFC 交界面测点集合的内外部温差则显著大于 G3 和 G4, 在 2~4 °C 之间。这表明 RFC 内部堆石的内外部温差较小, 不容易形成显著的温度梯度; 而在 SCC-RFC 交界面处的堆石, 其内外部温差较为显著, 这是由于 SCC-RFC 交界面附近本身就具备较高的温

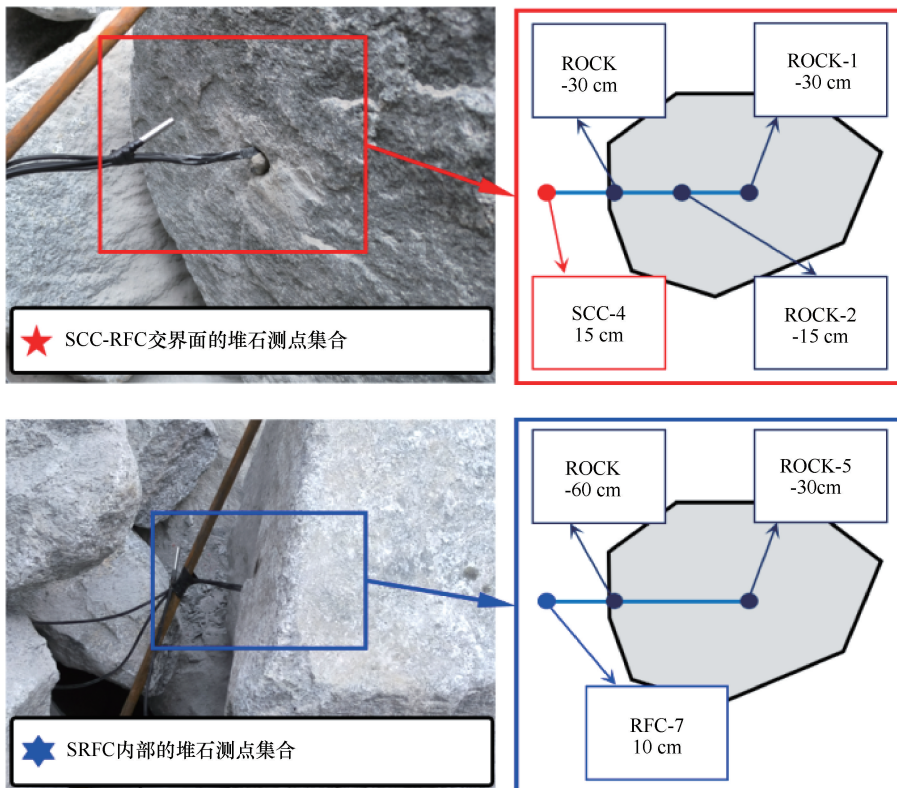


图 14 高程 2 701.3~2 703.8 m 温度测点的实拍

Fig. 14 Photos of temperature measurement points at EL2 701.3~2 703.8 m

表2 高程2701.3~2703.8 m的温度测点位置与指标汇总

Table 2 Locations and indicators of temperature measurement points at EL2701.3~2703.8 m

序号	测点集合	监测对象	距堆石表面距离/cm	仓面左侧距离/m	上游面距离/m	距底部高度/m	入仓温度/°C	峰值温度/°C	达峰时间/h	最大水化热温升/°C	最大温升速率/°C·h ⁻¹
1	G1	ROCK	-30.0	85.0	1.3	1.1	21.62	45.00	102.00	23.38	0.75
2		ROCK	-15.0	85.0	1.1	1.1	21.75	45.51	103.00	23.76	0.81
3		ROCK	0.0	85.0	1.0	1.1	21.37	46.03	103.00	24.66	0.86
4		SCC	15.0	85.0	0.8	1.1	19.63	47.82	104.00	28.19	1.08
5	G2	ROCK	-30.0	83.5	1.3	0.6	22.77	44.93	105.00	22.16	0.80
6		ROCK	-15.0	83.5	1.1	0.6	22.87	45.50	105.00	22.63	0.83
7		ROCK	0.0	83.5	1.0	0.6	22.31	46.28	106.00	23.97	0.90
8		SCC	15.0	83.5	0.8	0.6	24.00	47.60	105.00	23.60	1.11
9	G3	ROCK	-30.0	5.0	10.0	1.2	19.06	32.50	72.00	13.44	0.81
10		ROCK	0.0	5.0	10.0	1.2	20.18	32.56	72.00	12.38	0.86
11		RFC	10.0	5.0	10.0	1.2	21.56	32.75	72.00	11.19	0.59
12	G4	ROCK	-30.0	5.0	11.5	1.8	20.68	30.43	60.00	9.75	0.80
13		ROCK	0.0	5.0	11.5	1.8	22.18	30.93	60.00	8.75	0.90
14		RFC	10.0	5.0	11.5	1.8	23.02	31.75	60.00	8.73	0.83

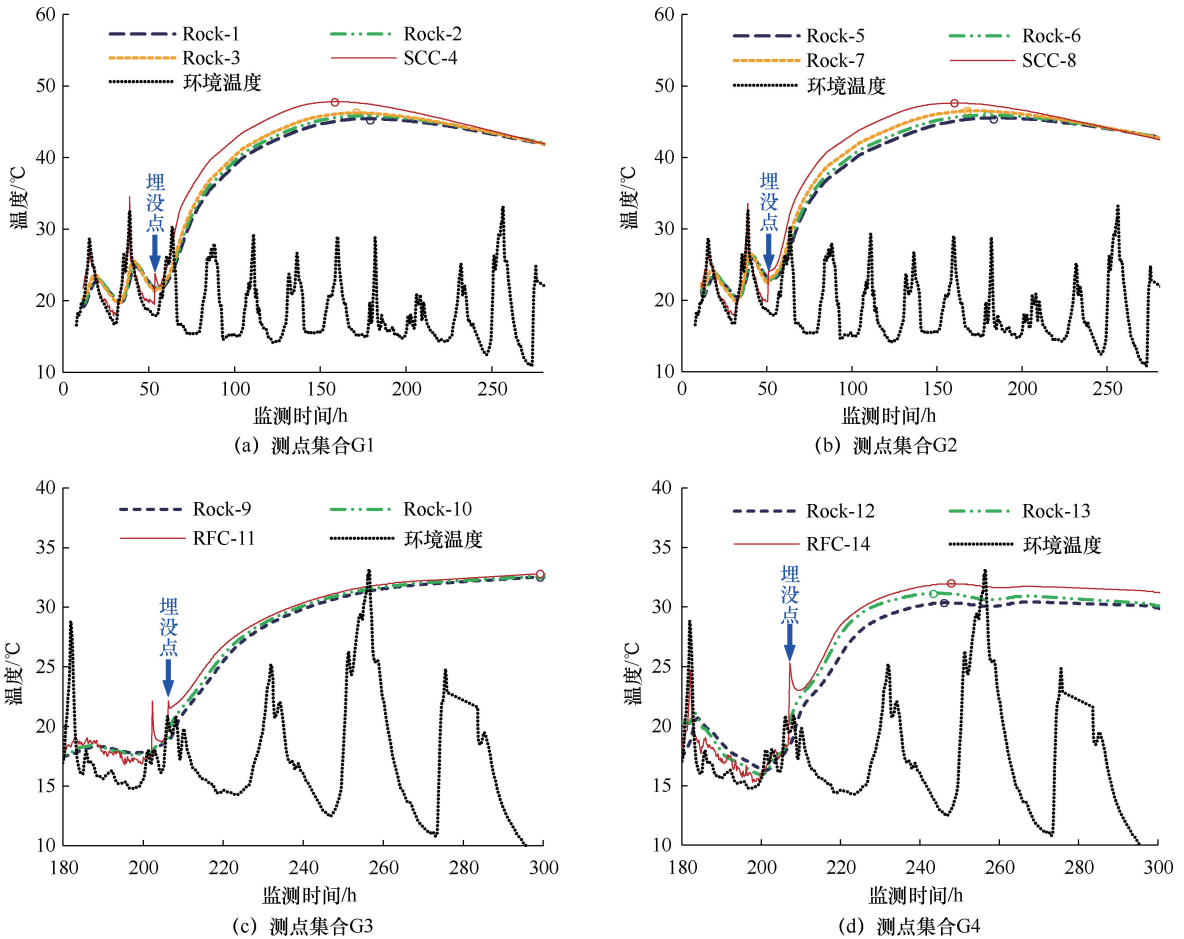


图15 高程2701.3~2703.8 m测点的温度变化曲线

Fig. 15 Temperature change curve of measurement points at EL2701.3~2703.8 m

度梯度导致的。温度达峰后, RFC内部的测点集合(G3和G4)的温度趋于稳定, 而SCC-RFC交界面处的测点集合(G1和G2)的温度则出现了显著下降, 这是由于G1和G2测点组更靠近上游面, 受表层混凝土

土与环境温度换热的影响较大, 而G3和G4测点组距离混凝土表面较远, 且则随着下一层混凝土的覆盖, 温度基本趋于稳定。

由图16可知, 尽管不同测点集合间的温度监测

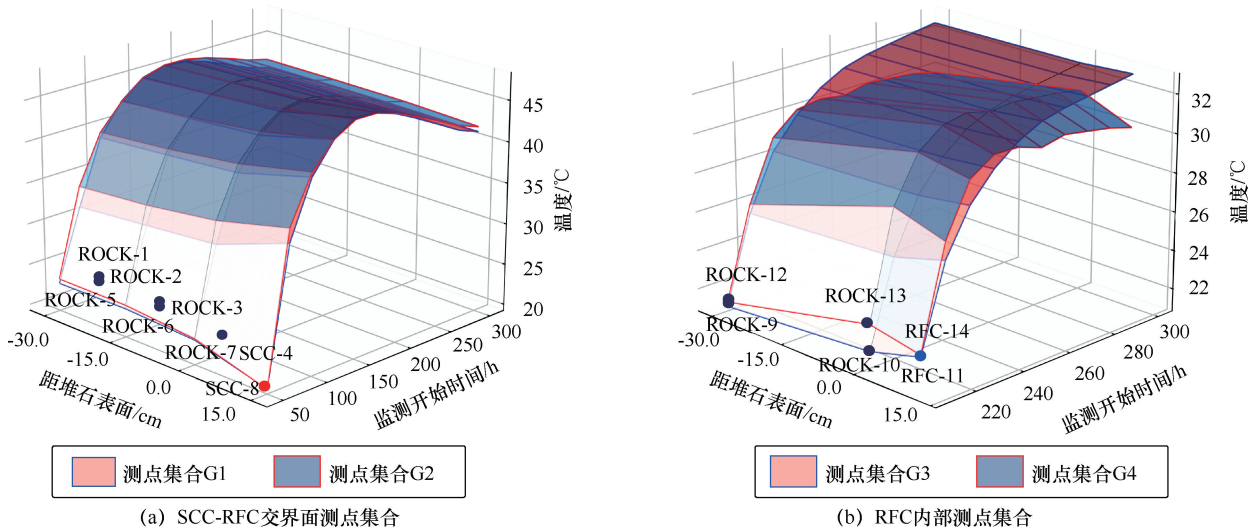


图 16 高程 2 701.3~2 703.8 m 测点温度的时空变化曲面

Fig. 16 Temporal and spatial variation surface of temperatures of measurement points at EL2 701.3~2 703.8 m

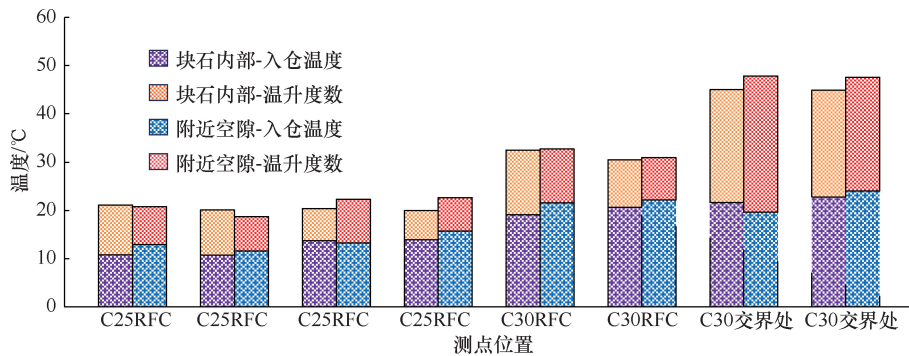


图 17 不同堆石内外部测点集合的温度指标对比

Fig. 17 Comparison of temperature indicators between internal and external measurement points in different rock-fill zones

数据有一定差异, 但同一测点集合的内外部温差相差较小, 且会随时间推移而逐渐趋于一致; 大约在 10 d 后, 升温阶段内外部温度差异较大的 G1 和 G2 也将基本趋同, 与余舜尧等^[17]的监测与分析结果基本一致; 在浇筑完成后第 10 d 时, 单个堆石中心与浅表层的温度已接近一致, 差异基本在 1 °C。这是由于浇筑完成后, SCC 和堆石表面将发生快速换热, 使堆石表面温度与 SCC 快速趋于一致; 余舜尧等^[17]和徐小蓉等^[19]认为, 上述快速换热过程主要发生在浇筑后 3 d 内。

进一步地, 对比其他仓面的堆石内外部测点发现 (见图 17), 堆石内部测点 (30 cm 深) 与堆石外部测点 (5~15 cm) 的入仓温度与水化热升温度数均相差较小, 在非极端情况下可以认为该类位置处不会产生较大的温度梯度。

4 结论

为分析高寒区堆石混凝土厚层一体化浇筑的仓内温度变化规律, 本文对高寒区叶巴滩堆石混凝土二道坝的坝体温度进行了跟踪监测, 累计在其 13 个施工仓面中布设了 83 个测点, 结果如下。

(1) 在高寒区抗冲耐磨一体化通仓厚层浇筑的情况下, 大坝的温控防裂重点在于上下游抗冲耐磨层, 而抗冲耐磨层的高温度梯度则更容易出现在上下游表面; 冬季施工时, 适当的表面保温覆盖能够有效降低抗冲耐磨层的开裂风险。

(2) 堆石与混凝土初期快速换热结束后, RFC 内部的堆石内外部温差不超过 1.5 °C, 而 SCC-RFC 交界面的堆石内外部温差则在 2~4 °C 之间, 这是由于 SCC-RFC 交界面附近本身就具备较高的温度梯度导致的。

(3) 当浇筑层厚增加 0.5 m 时, C25-RFC 的水化

热温升均值的变化幅度仅为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, C30-RFC 降低了 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而 C30-SCC 则从 $24.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $27.24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上升了近 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这说明 C25-RFC 和 C30-RFC 的水化热温升幅度在浇筑层厚适当增加后无显著变化, 而 C30-SCC 则会受浇筑层厚增加的显著影响。

(4)当混凝土类型和浇筑层厚一定时, 抗冲耐磨层的水化热温升度数相对稳定, 根据入仓温度即可初步确定峰值温度的变化范围; 同样地, 工程实践中可通过调整抗冲耐磨层混凝土的入仓温度来使其峰值温度满足设计要求, 抵消部分一体化厚层浇筑带来的影响。

参考文献 (References):

[1] 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.
YAO K F, TIAN S G, QI Y N, et al. Performance of concrete dams impacted by characteristic climate in high-altitude area: A review[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(6): 717-728.

[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] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 1-3.
LI Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 1-3.

[4] 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.
LIU Y, DU L G, QIAN W X, et al. Study on key technical problems of high concrete dam construction in alpine region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(3): 45-52.

[5] 金峰, 安雪晖, 石建军, 等. 堆石混凝土及堆石混凝土大坝[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 78-83.
JIN F, AN X H, SHI J J, et al. Study on rock-fill concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 78-83.

[6] JIN F, HUANG D R, LINO M, et al. A brief review of rock-filled concrete dams and prospects for next-generation concrete dam construction technology[J]. Engineering, 2024, 32: 99-105.

[7] 中华人民共和国国家能源局. 堆石混凝土筑坝技术导则: NB/T10077—2018[J]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
National Energy Administration of the People's Republic of China. Technical Guide for Rock-filled Concrete Dams. Chinese Standard: NB/T10077—2018 [J]. Beijing: China Water and Power Press,

2018.

[8] 中华人民共和国国家能源局. 水电水利工程堆石混凝土施工规范: DL5806—2020[J]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
National Energy Administration of the People's Republic of China. Construction Specification for Rock-filled Concrete of Hydropower and Water Conservancy Engineering: DL5806—2020 [J]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.

[9] JIN F, ZHOU H, HUANG D. Research on rock-filled concrete dams: A review[J]. Dam Engineering, 2018, 29(2): 101-112.

[10] 金峰, 张国新, 张全意. 绿塘堆石混凝土拱坝施工期温度分析[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 749-756.
JIN F, ZHANG G X, ZHANG Q Y. Temperature analysis for Lyutang RFC arch dam in construction period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6): 749-756.

[11] 徐小蓉, 金峰, 周虎, 等. 堆石混凝土筑坝技术发展与创新综述[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 1-11.
XU X R, JIN F, ZHOU H, et al. Review on development and innovation of rock-filled concrete technology for dam construction [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(2): 1-11.

[12] 柳春娜, 金峰. 堆石混凝土技术碳减排效益评价[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(2): 27-31.
LIU Chunna, JIN Feng. Analysis of carbon emission reduction benefits of rock-filled concrete [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2022, 8(2): 27-31.

[13] 王辉, 刘嘉瀛, 何世钦, 等. 自密实砂浆在堆石体中的填充性能研究[J]. 水力发电学报, 2024, 43(12): 34-42.
WANG Hui, LIU Jiaying, HE Shiqin, et al. An investigation into the compacting ability of self-compacting mortar in rockfill [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(12): 34-42.

[14] 何世钦, 陈宸, 周虎, 等. 堆石混凝土综合性能的研究现状[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 10-18.
HE S Q, CHEN C, ZHOU H, et al. Current research on comprehensive properties of rock filled concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 10-18.

[15] 金峰, 李乐, 周虎, 等. 堆石混凝土绝热温升性能初步研究[J]. 水利水电技术, 2008, 39(5): 59-63.
JIN F, LI L, ZHOU H, et al. Preliminary study on temperature rise property of thermal insulation of rock-fill concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(5): 59-63.

[16] 金峰, 张国新, 娄诗建, 等. 整体浇筑堆石混凝土拱坝拱梁分载法分析研究[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1307-1314.
JIN F, ZHANG G X, LOU S J, et al. Trial load analysis for integral casting RFC arch dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1307-1314.

[17] 余舜尧, 徐小蓉, 邱流潮, 等. 堆石混凝土浇筑前后的非均质温度分布试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(9): 1388-1400.
YU Shun Yao, XU Xiaorong, QIU Liuchao, et al. Experimental study on heterogeneous temperature distribution of rock-filled concrete before and after casting [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(9): 1388-1400.

- [18] 徐小蓉, 余舜尧, 金峰, 等. 整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度监测与等效均质仿真研究[J]. 水利学报, 2023, 54(12): 1404-1414.
XU Xiaorong, YU Shun Yao, JIN Feng, et al. Monitoring temperature and simulating homogeneity of integrally-poured rock-filled concrete arch dam during construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(12): 1404-1414.
- [19] 徐小蓉, 余舜尧, 金峰, 等. 堆石混凝土流动填充与温升过程原型监测[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 159-170.
XU Xiaorong, YU Shun Yao, JIN Feng, et al. Flow filling and temperature rise of rock-filled concrete based on prototype monitoring [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 159-170.
- [20] 徐小蓉, 金峰, 廖仕信, 等. 堆石混凝土坝信息化施工管理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 150-160.
XU Xiaorong, JIN Feng, LIAO Shixin, et al. Research of informatization in construction management of rock-filled concrete dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 150-160.
- [21] 何涛洪, 徐小蓉, 雷峥琦, 等. 绿塘整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度仿真研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 51-61.
HE Taohong, XU Xiaorong, LEI Zhengqi, et al. Temperature simulation on construction period of Lyutang integral casting arch dam of rock-filled concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 51-61.
- [22] HE J L, HUANG H X, JIANG H, et al. Experimental investigation into mode-I interfacial fracture behavior between rock and self-compacting concrete in rock-filled concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 258: 108047.
- [23] 罗滔, 黄陈霖, 张天祺, 等. 堆石混凝土劈裂抗拉破坏过程中声发射特征分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 40-50.
LUO T, HUANG C L, ZHANG T Q, et al. Analysis of acoustic emission characteristics during the splitting tensile failure process of rock filled concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 40-50.
- [24] 罗滔, 李玉洁, 杨毅, 等. 单块石粒径对自密实混凝土断裂性能的影响研究[J]. 水利学报, 2023, 54(10): 1177-1187.
LUO T, LI Y J, YANG Y, et al. Research on the effect of single rock size on the fracture performance of self-compacting concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(10): 1177-1187.
- [25] 黄河啸. 堆石混凝土岩块-SCC 交界面 I 型断裂性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
HUANG H X. Study on Mode-I Fracture Behavior of Rock-fill Concrete Block-SCC Interface [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [26] 李玉洁. 堆石混凝土断裂性能及堆石阻裂机理研究[D]. 西安: 西京学院, 2023.
LI Y J. Study on Fracture Performance of Rockfill Concrete and Crack Prevention Mechanism of Rockfill [D]. Xi'an: Xijing University, 2023.
- [27] 陆子铭, 赵厚然, 杨俊峰, 等. 寒冷地区堆石混凝土坝温度应力仿真分析: 以东庄二道坝为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(1): 31-38.
LU Z M, ZHAO H R, YANG J F, et al. Simulation analysis of temperature stress of rock-filled concrete dam in cold area: A case study of Dongzhuang auxiliary weir [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2024, 22(1): 31-38.
- [28] 赵厚然, 徐艳杰, 赵恒, 等. 叶巴滩堆石混凝土二道坝温度应力仿真分析及温控措施研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(2): 167-173.
ZHAO Houran, XU Yanjie, ZHAO Heng, et al. Thermal stress simulation and temperature control measures for the RFC end dam of Yebatan hydropower project [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(2): 167-173.
- [29] 罗键, 张全意, 曾旭, 等. 堆石混凝土拱坝整体浇筑质量检测分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(1): 101-109.
LUO Jian, ZHANG Quanyi, ZENG Xu, et al. Quality inspection and analysis of monolithic of rock-filled concrete arch dams [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2024, 22(1): 101-109.
- [30] 王涛. 超厚层高自密实混凝土堆石坝的施工方法[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(4): 111-114.
WANG Tao. Construction method of super-thick self-compacting concrete rockfill dam [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2022, 28(4): 111-114.
- [31] 刘强, 赵厚然, 姬广祥, 等. 高海拔高寒地区堆石混凝土坝温度应力仿真分析与温度监测[J]. 混凝土, 2023(6): 26-32.
LIU Qiang, ZHAO Houran, JI Guangxiang, et al. Simulation analysis and temperature monitoring of temperature and stress of rock-filled concrete dam in cold area of high altitude [J]. Concrete, 2023(6): 26-32.

(责任编辑 王璐)