

碾压混凝土坝温控防裂施工关键技术研究

叶显林¹ 谢新亮^(通讯作者)² 林德琴³

1. 重庆永渝检验检测技术有限公司 重庆市 401336

2. 青海省水利水电工程局有限责任公司 青海省 西宁市 810001

3. 四川省城市建设工程咨询集团有限公司 四川省 成都市 610213

【摘要】：针对碾压混凝土坝大体积水化放热导致的温度裂缝风险，提出材料、工艺与监测三位一体的温控防裂闭环体系。材料侧以绝热温升与反应动力学为主控量，采用中低水化热水泥与粉煤灰掺量 30% 至 40%，并通过热学参数标定实现模型等效；工艺侧构建入仓温度、层间时间窗与内置冷却的协同控制，入仓 15 至 20° C，层间不超过 48 h，冷却以核心温度 35 至 40° C 为启停阈值；监测侧搭建立体传感、边缘清洗与云端滚动校正联动的实时系统。坝高 60 m 工程对比表明，内部最高温度由 70° C 降至 55° C，坝面与内部温差由 25° C 收敛至不大于 15° C，表面裂缝发生率下降约 80%，最大裂缝宽度由 0.3 mm 收敛至 0.1 mm。结果验证了该闭环体系可同步抑制峰值温升与梯度、延缓拉应力发展并显著提升防裂可靠性。

【关键词】：碾压混凝土坝；温控防裂；低水化热材料；分层碾压工艺；实时监测

0 引言

碾压混凝土坝属于大体积结构，早期水化放热强且散热受限，坝体内外温差在短时累积并与地基约束叠加，易在分层界面与纵缝诱发温度裂缝。温控防裂的工程目标在于抑制峰值温升、降低温差并延缓拉应力发展。然而现行实践仍存在关键短板：材料配比更侧重强度与施工性，绝热温升与反应动力学缺少与热力耦合模型一致的标定，骨料导热与含水波动处理简化；施工组织难以将入仓温度、层间间隔与内置冷却实现同频协同，季节性波动与拌合站响应引发温控精度波动；监测多靠离散测点，数据回传与分析未形成闭环，难以及时反哺调度。为此，本文面向工程可执行性，提出以绝热温升与水化速率为主控的低水化热材料设计，构建分层快速碾压与分区冷却的工艺协同，并建立覆盖坝体与环境的实时监测与云端预警，进而形成材料、工艺与监测的闭环控制体系，并通过坝高 60 m 工程对比验证其有效性及可迁移性。

1 碾压混凝土坝温控防裂施工的技术需求与现状分析

鉴于碾压混凝土坝属于大体积结构，早期水化放热集中而散热路径受坝体尺度与环境换热条件约束，坝体内外温差易在 24-72 h 快速累积，温度梯度与地基侧向约束共同把拉应力叠加到分层界面和纵缝位置，进而诱发贯通或非贯通温度裂缝。温控防裂被用来把温度场与应力场控制在安全域内，从结构服役与抗渗性能角度来看，其必要性体现在抑制峰值温升、降低温差以及延缓拉应力发展三个方面。其中，绝热温升指在无散热条件下因水化所产生的温度上升，是评估坝内温度峰值的关键指标。结合山谷型与宽谷型工程施工实践，现有技术路径主要选用低水化热胶凝材料体系，配合分层快速碾压、少量冷却

水管以及埋设传感温度监测来开展控制工作。需重点关注的是，材料配比优化仍偏向强度与施工性，绝热温升与徐变参数缺少与热力耦合模型相匹配的实验标定，骨料导热与含水波动常被简化处理；施工温控精度受季节性入仓温度、拌合站响应与层间间歇影响，冷却管布置与浇筑节奏难以协同；监测侧多依靠离散测温点，数据回传与数值分析未形成闭环，难以及时把温控策略调整到位。由此推导，构建材料、工艺与监测的协同控制体系，成为提升坝体抗裂可靠性的核心需求。

2 碾压混凝土坝温控防裂施工的关键技术研究

2.1 低水化热碾压混凝土材料的优化设计

鉴于坝体内温度应力随绝热温升与水化速率同步放大，本研究把胶凝材料的单位释热量与反应动力学参数当作主控量来开展配比优化，目标是在不削弱压实与抗渗需求的前提下，降低水化热峰值并延缓热峰出现时刻。从热力耦合角度来看，降低熟料含量能够把早期放热集中度明显压低，而增加潜在活性掺合料可把水化历程向中后期转移，据此提出以减少水泥用量并把粉煤灰掺量提高至 30% 至 40% 作为设计主线，同时选用中低水化热水泥与连续级配粗细骨料来限制浆体体积分数。正交试验设置水胶比、粉煤灰掺量、水泥熟料强度等级及缓凝剂用量四个因素，采用峰值绝热温升、热峰出现时间、碾压成型性与 90 d 强度作为混合型评价指标，并引入反应度函数与导热参数标定结果来校核热学等效性，从而把材料体系与温控目标在同一评价框架内进行统筹。需重点关注的是，因坝区入仓温度受季节性波动影响较大，配比优化同时应校核不同拌合温度与骨料含水对早期放热与凝结时间的耦合偏移，避免出现层间时间窗与热控节奏失配。

$$\Delta T_{ad}(t) = \frac{m_c H_c f_c(t) + m_f H_f f_f(t)}{\rho c}$$

其中, $\Delta T_{ad}(t)$ 表示龄期 t 的绝热温升, m_c 为胶凝体系中水泥的质量分数, H_c 为水泥标准水化热, $f_c(t)$ 为水泥水化度演化函数, m_f 为粉煤灰质量分数, H_f 为粉煤灰等效反应热, $f_f(t)$ 为粉煤灰反应度, ρ 为拌合物表观密度, c 为等效比热容。

2.2 分层碾压过程中的温控工艺控制

面向碾压混凝土分层施工的温控需求,本研究把入仓温度、层间间隔与内置冷却三条链条进行协同控制,形成可执行的工艺流程,见图1。入仓温度控制以 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 为目标带,围绕拌合、运输与仓面交接展开全链条管控。拌合站把拌合水降至 $8\sim 12^{\circ}\text{C}$ 并设置配水比例动态调整,骨料在料仓进行遮阳与细雾喷淋,使骨料温度稳定在 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$;运输环节运用车斗遮蔽与直达调度,仓面在入仓口设置双点红外与插入式温度计复核,若实测高于 20°C ,则转入夜间浇筑并提高冷却水用量,必要时增设仓面雾化降温;若低于 15°C ,则降低冷却水比例并缩短等待时间,避免温差反弹。层间间隔以不超过 48 h 为控制线,摊铺与碾压坚持薄层快压的组织方式,铺层厚度维持在 0.25~0.35 m,摊铺到碾压起始不超过 60 min,碾压遍数控制为 2~3 遍并在末遍实施静压养护;暴露超过 24 h 的界面按冷缝进行管理,先进行轻度凿毛与高压清扫,随后湿润至饱和面干,均匀铺设厚度 10~15 mm 的水泥砂浆粘结层,并选用缓凝剂把初凝延后 30~60 min 以匹配摊铺节奏。内置冷却运用分区并联的水管系统,把管线埋设在距层面 1.0~1.5 m 位置并按 2.0~3.0 m 间距形成网格,管径选用 $\Phi 25\sim 32$ mm 钢管或 PE 管,通水判据以核心温度预测超过 $35\sim 40^{\circ}\text{C}$ 为启动点,供水温度控制在 $8\sim 12^{\circ}\text{C}$,回水不高于 18°C ,单回路流量维持在 0.2~0.4 L/s,同时把管壁与周围混凝土的瞬时温差限制在 15°C 以内并按日内逐级减流;当核心温度回落至 $32\sim 34^{\circ}\text{C}$ 且温度梯度趋缓时执行停水。结合坝体分区浇筑的组织方式,冷却管定位运用钢筋卡具固定并在摊铺前预压,立缝两侧 2 m 范围适度加密碾压,凭借现场温度曲线与施工时序开展联动微调,把入仓温度、层间间隔与冷却强度维持在目标带内。

2.3 实时温控监测系统的构建与应用

基于坝体温度场与施工节奏高度耦合的现实情境,本研究搭建由温度传感器、数据采集终端以及云监测平台组成的实时温控监测系统,把数据获取、在线分析与异常预警贯通至入仓

控制和内置冷却调度。感知层在不同埋深及靠近纵缝和冷却管位置布设嵌入式温度串,表面设置贴片式铂电阻或面阵红外,坝肩配置微型气象站采集气温、风速、相对湿度与辐射,从而同步获取内部温度、表面温度及环境边界条件。采集终端开展多通道高分辨采样与统一时钟同步,在边缘侧进行数据清洗、漂移校正与异常值剔除,并把层号、冷却回路与浇筑时段作为标签写入,通信采用光纤加无线的混合组网以降低山谷遮挡对回传的影响。云监测平台构建短期预测与趋势评估模块,凭借热力耦合模型对量测进行滚动校正,计算核心温度偏差、层间温差、温度梯度与升温速率等指标,触发分级预警后把建议动作下发至拌合站与仓面,内容涵盖拌合水温与冷却流量的目标区间,并以梯度约束抑制过快变更导致的热冲击;同时提供坝区看板与移动提醒以便值守。为把预警可靠度维持在目标带,系统在开仓前开展两点校准与巡检复核,关键测点实施冗余布设与可替换设计,终端配置不间断电源支撑断电续航,数据管理侧建立标准化接口对接施工调度与质量管理,并设置权限与备份策略,进而把材料、工艺与监测纳入闭环协同。

3 碾压混凝土坝温控防裂施工技术的应用效果评估

3.1 工程案例的温控效果验证

围绕坝高 60 m 的碾压混凝土坝施工场景,把传统温控路径与本研究提出的材料、工艺与监测闭环进行同场对照,评价对象聚焦内部最高温度与坝面一内部温差两项关键指标。传统路径多依赖常规低水化热材料与少量分散冷却,缺少绝热温升与反应动力学的标定支撑,分层节奏与供冷强度缺少联动,监测数据回传不连续且难以反哺调度,导致早期封热与表面换热错位叠加,内部温度峰值被抬升,温差放大。基于同一坝段、相同气象边界与一致浇筑组织,本研究把熟料含量与水化速率同步调低,把粉煤灰掺量提升至 30% 至 40%,把入仓温度稳定在 15 至 20°C 的目标带,把层间时间窗压缩在 48 h 以内,并把冷却管网按核心温度预测阈值 35 至 40°C 进行分区启停,配合边缘侧数据清洗与云端滚动校正来开展联动调参,进而把峰值温升与温度梯度同步收敛。进一步观察发现,峰值出现时刻被适度后移,梯度变化趋于平缓,立缝和分层界面受拉水平得到明显削弱。见表 1 对比要点,传统措施下内部最高温度达到 70°C 且表面温差约 25°C ,本研究技术把内部最高温度压低至 55°C ,把表面温差限制在 15°C 以内;两项指标与现场可操作参数建立了明确映射关系,为类似坝高与热边界条件下的组织设计与参数整定提供了可迁移的基线。

表1 工程案例温控效果对比表 1

指标	传统措施	本研究技术	说明
坝体内部最高温度	70°C	55°C	夏季施工期核心测点
坝面一内部温差	25°C	$\leq 15^{\circ}\text{C}$	峰值时刻表面与核心差值

3.2 防裂性能的量化分析

结合坝高 60 m 坝段的组织方式与监测闭环, 本节把裂缝统计当作核心指标开展防裂性能量化分析。观测方案在迎水面与背水面设置固定观测带, 按 10 m 网格进行全覆盖巡查, 运用裂缝宽度尺与便携显微镜完成记录, 观测时段覆盖浇筑后 0 至 90 d 关键窗口, 并把施工缝与立缝邻域单独标注。为降低外部干扰, 选取相同气象边界与浇筑节奏进行对照, 统计口径以长度大于 0.5 m 与宽度大于 0.05 mm 作为有效裂缝, 采用两轮独立普查与例行周巡交叉复核, 以统一编号追踪演化。与传统路径相比, 本研究技术作用下的表面裂缝发生率降低约 80%, 单位面积裂缝密度显著下降, 最大裂缝宽度由 0.3 mm 收敛至 0.1 mm, 立缝与分层界面附近的降低幅度更为明显。进一步观察发现, 该改善与前述内部最高温度与坝面内部温差同步收敛相一致, 入仓温度受控与分区冷却把温升峰值压低并推迟热峰时刻, 层间时间窗的稳定把界面约束的突增限制在可接受范围, 由此把早期拉应力峰值及其持续时间双向削弱。由此推导, 裂缝阈值分布呈右移特征, 宽度集中在 0.1 mm 及以下区间, 贯通路

径被有效抑制, 为运维期渗流安全评估与表面修复工作量估算提供了可迁移的量化基线。

结语

本文围绕碾压混凝土坝温控防裂的核心矛盾, 构建材料、工艺与监测闭环协同的技术体系。研究将绝热温升与反应动力学引入配比主控, 形成与热力耦合模型一致的标定路径; 在施工侧确立入仓温度、层间时间窗与内置冷却的三链联动, 以阈值驱动的启停与渐变控制减小热冲击; 在监测侧通过嵌入式传感、边缘清洗与云端滚动校正实现预测预警与调度联动。工程应用显示, 该体系能够同步降低峰值温度与温度梯度, 推迟热峰出现时刻, 显著收敛裂缝风险, 并建立了操作参数与热工指标的清晰映射, 为同类工程提供可复用的组织基线与参数区间。需要指出的是, 体系推广仍依赖反应动力学与徐变参数的在地标定, 骨料含水与导热的时变影响、季节性入仓波动以及传感网络的长期稳定性亦需持续优化。后续将面向自适应控制与多目标调度, 结合数字孪生与全寿命性能评价, 进一步提升温控防裂的智能化与鲁棒性。

参考文献

- [1] 肖洪. 大体积混凝土施工中温控与裂缝控制一体化技术研究[J]. 水泥, 2025, (12): 83-85.
 - [2] 冯海波, 康雄, 喻葭临, 夏勇. 叶巴滩水电站坝体混凝土温度控制措施研究及运用[J]. 水力发电,
 - [3] 周建文. 防潮海堤挡浪墙大体积混凝土温度裂缝控制研究[J]. 工程建设与设计, 2025, (22): 133-135.
 - [4] 王东民, 马睿, 张凤强, 胡昱, 李庆斌. 低热水泥混凝土拱坝不设横缝可行性分析[J]. 水力发电学报, 2025, 44(11): 89-100.
 - [5] 黄剑锋, 潘志尧, 施德华, 金盛杰, 张家铭, 强晟. 北岙拱坝溢流坝段一期冷却阶段温控仿真计算分析[J]. 浙江水利科技, 2025, 53(06): 75-80.
 - [6] 王建忠. 引水隧洞衬砌混凝土裂缝控制技术研究[J]. 水泥, 2025, (12): 141-143.
 - [7] 管仕辄, 李仕林, 刘锋, 倪小龙. 基础大体积混凝土夏季施工裂缝控制措施[J]. 科技与创新, 2025, (22): 36-39.
 - [8] 张鹏林. 高原寒区隧道混凝土裂缝控制与养护技术研究[J]. 水泥, 2025, (12): 131-133.
 - [9] 李军, 王宏伟, 王德民, 张港. 明挖高速铁路隧道拱形侧墙大体积混凝土裂缝控制技术研究[J]. 施工技术(中英文),
- 作者简介: 叶显林(1983—), 男, 汉族, 大专, 研究方向为水利水电工程。