

大体积混凝土智能温控关键技术研究与应用

王小达

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：针对传统大体积混凝土温控人工监测滞后、调控固化、温控精度不足，易引发温度裂缝的工程难题，本文系统分析混凝土温控开裂机理与传统技术缺陷，构建集多参数智能感知、AI温度场仿真、动态自适应调控于一体的智能温控技术体系。结合混凝土重力坝工程开展实践应用，验证该技术可精准控制温差与温降速率，有效杜绝有害裂缝，兼顾工程质量、经济效益与绿色施工价值，适配复杂施工工况。

关键词：大体积混凝土；智能温控；关键技术；应用

引言：大体积混凝土广泛应用于水利水电工程中的重力坝等重点结构，施工中水泥水化热积聚易产生温差应力，诱发结构裂缝，危害结构安全与耐久性。传统温控技术以被动防控为主，存在监测精度低、实时性差、调控僵化等诸多短板，难以适配复杂多变的现场施工条件。为破解温控防裂难题，本文依托水利工程实践，研究智能温控关键技术，构建全流程闭环管控体系，为大体积混凝土精细化、智能化温控施工提供技术支撑。

1 大体积混凝土温控机理及传统技术缺陷分析

1.1 大体积混凝土温度应力与开裂机理

(1) 大体积混凝土浇筑后，水化反应释放大量水化热，因导热系数低、结构厚，内部热量积聚难散，表层与外界热交换，形成不均匀温度场：早期快速升温、中期峰值稳定、后期缓慢降温。(2) 混凝土升降温阶段产生体积变形，内部膨胀大、表层变形受限，受自身约束及温降速率过快影响，形成温度拉应力，是温度应力的核心成因。(3) 当拉应力超过混凝土当期抗拉强度时，诱发裂缝，由表层向内延伸，破坏结构整体性，降低刚度、抗渗性与耐久性，严重时影响重力坝承载安全。

1.2 大体积混凝土温控影响因素分析

(1) 材料因素是温控基础，低热硅酸盐水泥可有效降低水化热总量，连续良好的骨料级配能提升结构密实度，各类缓凝、减水外加剂可延缓水化放热速率，科学优化配合比能够减少水泥用量，从源头控制温升问题。(2) 施工因素直接决定温度场状态，混凝土入模温度过高会大幅提升初始温升峰值，一次性整体浇筑、浇筑速度过快易造成热量集中堆积，合理分层分块浇筑可分散水化热，改善内部散热条件。(3) 环境因素属于外部干扰条件，环境气温、现场风速与空气湿度会影响混凝土表面散热速率，大风、低温、干燥环境易加大内外温差，干扰温控效果，诱发表面开裂问题^[1]。

1.3 传统温控技术体系及局限性

(1) 现阶段传统温控手段以被动防控为主，主要包括预埋冷却水管通水降温、人工洒水保湿养护、表层保温材料覆盖养护、人工定点被动测温监测等常规技术方式，工艺简单、应用广泛。(2) 传统监测技术存在明显弊端，依靠人工采集数据存在滞后性，布设测点数量有限、覆盖范围不足，无法实现全天候实时连续监测，且人工读数记录易产生偏差，数据准确性较差。(3) 传统调控技术短板突出，温控参数多为施工前预设固化，无法根据实时温度变化自适应调整，调控模式单一僵化，难以适配复杂多变的施工工况，温控精准度与稳定性难以保障。

2 大体积混凝土智能温控核心关键技术体系

2.1 多参数智能感知监测技术

(1) 针对大体积混凝土深埋测温、大范围、长时间监测的工程特点，智能温控体系采用光纤传感与高精度数字智能传感器作为核心感知设备，传感器选型遵循稳定性强、抗干扰、耐腐蚀、适配深埋浇筑环境的原则。设备布设遵循“重点加密、全域覆盖”的原则，在结构中心高温区、表层散热区、约束应力集中区、浇筑分层界面及边角薄弱区域重点布设测点，有效适配大体积混凝土厚体量、大范围、多工况的监测场景，全面捕捉结构温度与应力变化特征。(2) 系统依托前端传感设备，实现混凝土温度、内部应力、表层湿度、环境温风速等多维度参数的同步实时采集，通过无线传输模块完成数据的不间断上传。配套数据传输与预处理技术可自动筛选有效数据、统一数据格式、剔除无效冗余信息，保证监测数据传输连续、稳定，为后续仿真分析与智能调控提供完整数据基础^[2]。(3) 针对施工现场环境复杂、信号干扰、设备波动带来的数据误差问题，技术体系搭载专业数据降噪与异常识别算法，可自动过滤波动噪声数

据,精准识别突变、断连、偏移等异常数据信号。同时结合现场人工校准与系统自动校准机制,修正设备温度漂移与系统偏差,大幅提升监测数据的真实性与可靠性。

2.2 基于AI的温度场仿真预测技术

(1) 依托Midas、ANSYS等专业有限元软件,构建大体积混凝土三维精细化温度场仿真模型,根据工程结构尺寸、浇筑分层、材料热工参数、边界散热条件等信息完成模型网格划分与参数赋值。通过定义水化热放热函数、环境换热系数及约束条件,真实还原混凝土浇筑升温、温峰维持、降温收缩的全过程温度场演化过程,实现对结构温度与应力分布的精细化模拟。(2) 为提升预测准确性,结合粒子群算法与神经网络算法构建温度应力智能预测模型,以实测入模温度、环境参数、水化热参数作为输入样本,以结构温度、应力变化作为输出目标,通过样本训练不断优化模型权重与阈值,实现对不同施工阶段温度应力变化规律的智能预测,弥补传统有限元静态仿真的滞后性缺陷。(3) 采用实测数据实时反馈修正机制,将现场实时监测数据持续导入仿真模型,动态更新模型边界参数与热工参数,对模型预测结果进行迭代修正。有效解决传统仿真模型参数固化、工况适配性差的问题,显著提升复杂施工工况下温度应力预测精度,实现仿真结果与现场实际高度契合^[3]。

2.3 智能化动态调控与养护技术

(1) 基于规范阈值与工程实际建立温差智能判定机制,结合内外温差、降温速率、应力数值构建多级开裂风险预警体系。系统可自动识别安全、可控、预警、高危等不同风险等级,分级触发对应管控策略,提前预判裂缝风险,实现从被动处置向主动预防的转变。(2) 依托实时监测数据与AI预测结果,形成自适应智能调控技术,可根据结构内外温差与温降状态,动态调节冷却水循环流量、启闭时间与运行频率,同时联动智能保温覆盖、自动喷淋养护设备,实时调整保温保湿强度,精准平衡混凝土升温与散热节奏,避免温差超限与温降过快引发的开裂问题。此外,针对水利水电施工分散、临时用电复杂的特点,研发智能临时配电箱远程监控系统,集成漏电保护、负荷监测、远程分合闸等功能,通过云平台实时掌握各施工区用电状态,动态调配电力资源,保障温控设备(冷却水泵、喷淋系统)不间断供电。(3) 构建端-边-云协同智能温控平台架构,终端负责数据采集与设备执行,边缘端完成实时数据处理与本地调控,云端实现数据存储、全局分析与远程管控。管理人员可通过云端平台实时查看施工状态、远程下发调控指令,实现大体积混凝土温控全过程的智能化、远程化、

自动化管控^[4]。

2.4 智能温控技术防裂原理与技术优势

(1) 智能温控技术核心为监测-预测-调控一体化防裂机制,通过前端智能感知实时掌握结构温度应力状态,依托AI仿真模型预判后续温度演化趋势与开裂风险,再通过自适应调控设备提前干预温度变化,从源头控制温度应力产生与累积,有效规避温差超限问题,形成全过程闭环防裂控制体系。(2) 相较于传统温控技术,智能温控体系具备显著技术优势,监测层面实现全域、连续、高精度数据采集,杜绝人工监测误差与数据滞后问题;调控层面可动态自适应适配复杂工况,突破传统参数固化、被动调控的短板;施工层面大幅提升温控效率与管控精度,减少人为因素干扰,适配各类大体积混凝土复杂施工场景,防裂效果与工程适用性远优于传统温控技术。

3 工程应用实例与技术效果验证

3.1 工程概况与温控难点

(1) 本次依托某水利枢纽工程混凝土重力坝开展应用验证,工程主体为碾压混凝土重力坝结构,坝体最大厚度大、单次浇筑方量高,属于典型大体积混凝土施工工况。项目施工周期处于夏季高温时段,现场昼夜温差波动较大,施工区域露天作业占比高,受自然环境影响显著。工程采用通仓薄层连续浇筑工艺,层间间隔时间短、施工连续性要求高,对混凝土温控防裂水平有着严格标准。(2) 本工程温控施工存在多项技术难点,夏季高温环境导致混凝土入模温度偏高,水泥水化热释放集中,内部热量极易大量积聚;坝体截面尺寸大,内部散热路径长、散热速率慢,极易形成显著的内外温差;施工现场风速、温湿度变化频繁,不稳定的外部环境进一步加大了温度裂缝的产生风险,传统固定模式温控手段难以适配现场复杂工况。(3) 结合设计规范与工程建设要求,本工程明确了严格的温控及质量控制目标,核心控制混凝土最大内外温差、降温速率、内部最高温升等关键参数,确保全过程温控指标符合规范要求。最终实现坝体结构无有害温度裂缝、混凝土成型密实、强度达标,保障大体积混凝土重力坝的整体性、稳定性与长期耐久性能。

3.2 智能温控技术现场实施方案

(1) 结合本工程重力坝结构特点与温控需求,制定智能化监测布设方案,在坝体核心升温区、表层散热区、坝踵坝趾约束区及薄层浇筑结合面位置布设光纤传感器与智能测温设备,实现关键区域全覆盖监测。设备严格按照施工规范完成预埋、固定与线路防护,浇筑前

完成系统通电调试、数据校准、信号测试工作,确保监测设备运行稳定、数据传输通畅。(2)依托Midas有限元仿真软件建立本工程三维温度场计算模型,结合现场原材料参数、配合比、入模温度、环境条件完成模型边界条件与热力学参数设定。基于构建的AI预测模型,对混凝土浇筑、升温、温峰、降温全过程的温度及应力演化规律进行动态预测,提前预判温控风险点,为现场调控提供前置技术指导^[5]。(3)根据仿真预测结果与实时监测数据,制定现场智能调控与养护标准化流程。系统依据温差阈值自动触发分级调控指令,动态调节冷却水循环流量与运行时长,联动智能喷淋、自动保温设备开展自适应养护。临时配电箱远程监控系统实时反馈各温控设备用电状态,异常时自动切换备用线路,保障调控连续可靠。全程实现无人化智能管控,替代传统人工定时养护、手动测温的作业模式,形成标准化、智能化施工流程。

3.3 现场监测数据与仿真结果对比分析

(1)通过全过程实时监测可知,混凝土浇筑后内部温度快速上升,短时间内达到温度峰值后缓慢平稳下降,表层温度随环境变化小幅波动,整体呈现内部温升快、降温慢,表层温度响应环境变化的规律。工程智能调控有效控制了内外温差差值,未出现温差突变、温降过快等异常情况,温度场整体变化均匀、稳定。(2)将现场实测温度数据与AI仿真预测数据进行逐时段对比,结果显示两者变化趋势高度一致,数值偏差较小,整体误差控制在规范允许范围内。(3)在浇筑初期、温升峰值期、缓慢降温期等不同施工阶段,智能系统均能精准捕捉温控参数变化,及时完成动态调控。温升阶段有效抑制温度快速积聚,降温阶段平稳控制温降速率,全程规避温差超限问题,各阶段温控效果均优于传统施工管控模式。

3.4 应用效果综合评价

(1)质量效果方面,本工程采用智能温控技术后,混凝土重力坝结构成型平整密实,整体性良好。施工全

过程未出现有害温度裂缝,细微裂缝数量远少于传统施工工艺,混凝土强度、抗渗性等指标均满足设计及规范要求,整体施工质量得到显著提升,结构耐久性与安全性得到有效保障。(2)经济效益方面,智能温控技术实现自动化监测与调控,大幅减少人工测温、人工养护、设备值守的人力投入;精准的动态调控降低了水资源、电能消耗,同时规避了裂缝修补、返工整改等额外成本,相较于传统温控模式,整体施工运维成本显著降低,经济效益突出。(3)社会效益方面,智能化管控简化了施工流程、缩短了温控养护周期,有效提升整体施工效率。全程数据可追溯、风险可预判,极大提升了大体积混凝土施工的安全性与可控性。同时精准节能、低损耗的施工模式减少资源浪费,契合绿色施工理念,为同类水利水电工程提供了优质的技术参考与借鉴。

结束语

本文整合智能感知、AI仿真、动态调控技术,建立完善的大体积混凝土智能温控体系,有效弥补传统技术短板,实现温控从被动处置到主动预防的转变。工程实践表明,该技术可稳定控制混凝土重力坝温度场变化,彻底杜绝有害温度裂缝,显著提升施工质量,同时节约人力、物料成本,提升施工效率。后续可进一步优化算法模型,深化多工况适配研究,为同类水利水电工程智能化温控施工提供更完善的参考。

参考文献

- [1]杜长勃,黄玮.高原混凝土温控防裂与施工实践研究[J].四川水力发电,2022,39(6):97-104.
- [2]李祥斌,张奇.浅谈大体积混凝土温控技术[J].四川水泥,2023,16(12):77-81.
- [3]邓世顺,王振红,汪娟.大坝混凝土施工期温控措施的时间和空间优化[J].人民黄河,2024,41(8):124-128.
- [4]杨翠萍,孟广清,石方建.徐州刘山北泵站大体积混凝土施工期温控防裂应用研究[J].江苏水利,2023,10(7):49-53.
- [5]熊玉荣.大体积混凝土温控防裂技术的研究与应用[J].门窗,2025,21(12):264-266.