

水利工程大体积混凝土温控技术措施优化及智能监测系统应用研究

朱广超

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：水利工程项目中大体积混凝土施工作业中，水泥水化热集中释放回导致内部温度上升，而出现诸多的裂缝隐患问题。为了解决此种问题，探究水利工程大体积混凝土温控技术，利用智能监测系统进行持续性、动态监控，可以有效获得实时性信息数据，切实提高水利工程项目施工质量。因此，文章，综合水利工程大体积混凝土项目，探究了温控技术措施优化路径以及智能监测系统的应用，以供参考。

【关键词】：水利工程；大体积混凝土；温控技术；智能监测系统

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.038

引言

水利工程项目包括了大坝、水电站、提防等多种建筑结构，在这些建筑结构施工中大体积混凝土施工是核心技术流程。但是在在大体积混凝土浇筑以及应用施工中，受到水泥水化反应的影响，导致其释放了大量的热量，出现温度应力，继而诱发了严重的裂缝问题，严重的影响了结构的安全性。为了有效解决此种问题，通过温控技术进行处理，利用智能监测系统可以实现动态管控。

1 项目概述

某水利水电站项目主要包括了混凝土、泄洪建筑结构以及发电系统。其所在区域复杂。其中泄洪洞位于左岸的山体结构中，全长共有 1356.8 米，衬砌混凝土厚度为 2.8~4.2 米，属于典型的大体积水工隧洞衬砌结构。

在此项目施工中要应用大体积混凝土浇筑技术，但是因为水化热积聚、冷却调控粗放以及表层保温薄弱等因素的影响，导致其内部与外部出现带不同程度的温差问题。因此，在内部高水化热的影响之下，导致内部温度技术升高，通过粗放化的冷却管理会导致降温收缩应力问题显著，而表层保温薄弱能力不足，则会导致其成为应力释放的薄弱面，最后产生裂缝问题。

为了解决此种问题，在源头上有效降低裂缝等问题，此项目拟应用及智能监测系统以及温控技术进行精细化管控，通过源头控制，有效降低水化热、过程精准控制采取多元降温技术、强化表面强化保温防护，基于智能监测系统进行持续性动态分析。

2 温控技术措施优化与智能监测系统应用方案

2.1 混凝土配合比的系统性优化

基于源头控制，可以有效降低水泥水化热问题。因此，在此项目中从源头降低水化热是温控的第一道防线。攻关小组在试验室开展了为期 15 天的配合比优化试验，最终确定了适用于泄洪洞大体积衬砌混凝土的优化配合比。

2.1.1 胶凝材料体系

主要应用地热硅酸盐水泥，降低水化热，提高粉煤灰掺量比例，稀释水泥用量，根据实际状况合理应用抑制剂，避免热量集中积聚。最后，在施工中，必须要严格控制骨料预冷与入仓温度，其主要措施如下：

2.1.2 粗骨料风冷管道设置

在拌和楼料仓中设置风冷管道，充分利用夜间低温空气的作业，实现粗骨料预冷处理，冰雪将骨料温度供水在 8-12℃ 左右。第二，应用温度 2-4℃ 的冰水进行混凝土拌和；在运输中设置 3cm 厚的保温层，在料斗上方位置设置遮阳棚，继而有效减少运输过程中的太阳辐射吸收等问题。最后，要优化洞内运输组织结构，在 45 分钟以内完成混凝土出机到入仓的整个流程。充分保障混凝土入仓温度控制在 18—22℃ 之间，符合技术标准要求。

2.2 冷却水管布设方案

冷却水管是保障混凝土内部温度稳定的关键所在。在此项目中，泄洪洞衬砌结构厚度相对较大、钢筋密集性，因此必须要根据实际状况进行精细化设计与分析。

2.2.1 管材选择与参数设置

冷却水管主要就是应用 HDPE 高密度的聚乙烯管材，其中外径参数为 32mm、壁厚 2.5mm。此类型的 HDPE 管不仅可以有效满足应用需求，也可以避免局部过冷等问题出现。在此项目中主要是通过双层双回路的方式设置水管。在厚度为 4.2m 的衬砌断面施工中，在距离内衬 1.0m 的位置设置上层水管材质，距离内壁 2.5m 左右设置下层水管。其中，每层水管之间间距控制在 1.2m 左右，呈现蛇形状布设。将单个回路长度保持在 180m 以内，将进出口水温差控制在 4℃ 以内。

浇筑作业中，划分左中右三个独立冷却分区，在各个分区中设置独立的进出水口、流量调节设备。通过分区控制可以根据差异化进行针对性处理，效果更为直接。

2.2.2 水管固定与保护措施

在泄洪洞中衬砌钢筋密集呈现相对较高，影响了水管的设置。因此，在此项目中主要就是应用塑料卡扣固定水管钢筋，将间距控制在 1.0m 以内，充分保障水管在混凝土浇筑振捣作业中不会出现位移或者上浮等诸多问题。在水管转弯的位置设置专用弯头配件，并且保障转弯半径控制在 30cm 以内，方可有效避免堵塞等问题的出现。

最后，在施工中用水管穿过施工缝隙的位置，利用长度为 50cm 的钢套管做好保护处理，合理设置膨胀止水条，做好间隙风格，避免施工缝隙渗水出现渗漏影响。

2.3 表层保温与养护措施的强化

表层保温是有效控制内外温差、避免表面裂缝的关键流程之一。在此项目中，根据实际状况对保温措施进行了全面强化是处理。

2.3.1 多层复合保温体系

混凝土浇筑完成并且完成初凝之后，可以在表面覆盖一层厚度为 0.12mm 的厚塑料薄膜系统，保障薄膜搭接的宽度不得小于 15cm，通过胶带进行密封接缝处理，构建一个密闭的保湿层结构，则可以避免水分蒸发等问题的出现。

同时，在塑料薄膜上要设置厚度为 2cm 的橡胶保温棉被，提高保温效果。在大体积混凝土施工作业中，在温度梯度最大的状态中进行拆模处理，要基于“随拆随盖”进行标准化作业。其中模板每拆除一段，要根据技术流程用保温被覆盖一段，这样则可以在最大程度上有效缩短混凝土表面结构裸露的时间。而对于不便于覆盖的顶拱位置，可以通过喷涂聚氨酯泡沫邓方式进行保护处理，厚度控制在 3cm 左右，形成无缝保温层。

2.3.2 保温时间与拆除时机

根据混凝土内部温度检测信息数据确定保温时间以及具体的拆除节点。在混凝土内部最高温度与环境中最低温度的差额不足 15℃ 的时候，逐步拆除保温层。在拆除过程中要严格执行标准流程，每次拆除面积不得小于总面积的 30%，间隔时间至少为 12 小时，方可有效保障整体效果。

3 智能通水调控监控系统应用

通过智能进行远程化、精细化以及全程化动态控制，可以有效满足施工温度控制与管理的既定目标，在实践中其主要框架以及功能主要如下：

3.1 系统架构

智能通水调控系统主要控制层、数据传输以及云端决策三个层次。其中现场控制层主要就是在混凝土内部结构中设置，利用传感器等设备进行数据信息采集，基于智能控制设备进行指令调控，利用调节电动阀对各个区域通水流量进行实时性调控。系统在应用中主要是通过“有线+无线”的方式进行组

合处理。通过无线网络覆盖整个施工作业面，利用智能设备进行网关连接，在将获得的信息数据上传到云端服务系统中。基于云端决策层进行数据模拟动态方针，预测变化特征，根据温控目标进行自动化调控。其中，智能通水调度系统架构与功能配置如表 1 所示。

表 1 智能通水调控系统架构与功能配置表

系统构成	核心功能	技术配置
现场控制层	流量自动调节、参数实时采集	智能控制柜 (PLC) + 电动调节阀 + 电磁流量计
数据传输层	数据汇聚与远程回传	工业 Wi-Fi + 4G 网关 + LoRa 备用链路
云端决策层	温度场仿真与通水方案优化	MPC 算法 + 遗传优化 + 有限元模型
调控策略	分阶段自适应通水	升温期：小流量缓冷 降温期：变流量精准控温 稳定期：间歇通水养护
约束条件	温控阈值自动判定	最高温度 ≤ 52℃ 内外温差 ≤ 20℃ 降温速率 ≤ 2.0℃/d

3.2 智能化通水模式

基于智能通水系统针对混凝土不同龄期阶段的温控需求，设置了三种不同的通水模式：

3.2.1 初期阶段

属于小流量缓冷模式，此阶段主要就是在混凝土浇筑之后的 48 小时以内。在此环节中水化反应剧烈，内部温度呈现快速上升 以及变化的趋势。在整个阶段中要明确削峰是重点，因此，要应用单管流量 0.8--1.2m³/h 的小流量充分持续通水，达到控制温度的目的。

3.2.2 中期降温

此阶段的重点就是要实现精细化调控。混凝土达到温度峰值之后进入到降温过程。在整个降温处理中，最为关键的就是要做好裂缝防控。通过系统进行处理，可以基于实时性温度变化特征、综合目标降温曲线特征、偏差等多种因素进行分析，对水流量进行动态调控，保障降温速率符合设计的目标曲线。在监测到的降温速度出现波动的时候，会根据实际状况进行自动调控。

3.2.3 后期稳定

此阶段主要就是通过间歇通水养护模式进行出差。在温度降低到与环境温差相差到 15℃ 以内的时候，系统会进入到间歇通水模式中。通水周期主要通水 2 小时，停止 4 小时。通过循

环水维持到特定的温度环境，则可以有效避免因混凝土干燥收缩而出现的裂缝等问题。

3.3 应急处理与异常管理

在系统中设置了异常处理逻辑模块。在环境气温呈现骤降状态的时候，系统则会自动转换为保温通水的模式，而减少冷却水的流量则可以切换到温水循环模式中。通过此种方式可以应对不同环境的变化需求。

3.4 智能监测系统的全面部署

为了实现对大体积混凝土结构的全面分析，了解温度场的变化特征，在此项目中基于智能检测系统进行综合控制。

3.4.1 传感器布设

每个保障浇筑仓号中设置 24 支数字温度传感器设备，严格遵守“三层四列两排”的空间网格方案，进行标准化设置。在设置中，垂直方向通过上、中、下三层，保障其距离内壁 0.8 米、2.1 米、3.4 米；而在进行水平方向设置中，要间隔 4m 的距离设置监测断面。

同时，冷却水进出口位置要设置温度传感器设备、电磁流量计等相关设备，对通水参数以及变化特征进行信息数据采集，利用多种设备了解边界条件以及信息数据变化特征。最后通过可视化监测平台进行分析，获得时间曲线以及不同阶段的变化特征。每日凌晨自动生成温控报表。

3.4.2 数据采集与传输

在大体积混凝土浇筑过程中，基于智能监测系统系统进行信息数据采集。采样频率 5 分钟一次，可以实现信息数据实时性上传。同时，系统设置了数据断线传输机制，在出现网络中断等问题的时候，可以通过本地信息数据库进行数据存储，在恢复网络之后进行数据自动上传，充分保障了信息数据的完整性。

3.4.3 可视化监测平台

在云端设置了基于 B/S 架构的可视化监测平台。通过各个终端系统以及手持设备实现全流程防控，平台主要功能包括：

第一，三维温度场云图分析。可以基于 BIM 技术进行模

型数据导入，利用轻量化模型进行数据分析，通过传感器测点、模型空间坐标进行同步管控。另外，平台基于离散测点温度数据可以构建三维温度场，通过只管的数据变化、颜色波动等分析温度分布状态以及实际状况。用户可以根据需求进行任意区域的温度信息数据分析。

第二，时程曲线分布。通过平台自动绘制不同区域的温度曲线特征，通过对比控制阈值的方式分析变化规律，如果曲线高于临近阈值，自动报警。

3.5 效果分析

在此项目中通过多种方式协同管理，实现动态监控，利用智能温控体系进行精细化管理，效果显著，其各项检测指标以及温度控制如表 2 所示。

表 2 智能温控体系应用效果表

致裂机理	致裂表现 (前期)	技术对策	控制效果 (智能温控后)
水化热积聚	内部最高温度 63.8°C	配合比优化 (低热水泥+抑制剂+预冷)	最高温度降至 48.2°C (平均)
降温速率失控	最大降温速率 6.2°C/d	智能通水精准调控 (MPC 算法+分阶段策略)	降温速率稳定在 1.5°C/d (平均)
表层保温薄弱	最大内外温差 30.8°C	多层复合保温体系 (膜+棉被+帆布)	最大温差控制在 16.4°C (平均)

4 结语

大体积混凝土在水利工程项目中广泛应用，但是受到水泥水化热等多种因素的影响，导致其容易出现温差裂缝等问题。对此，为了提高水利工程项目施工质量，必须要重点做好温控管理。而基于现代化技术手段，通过材料-工艺-监测的角度系统分析，构建一体化智能监控模块，可以有效满足大体积混凝土的温控监控需求。今后，在发展中随着绿色技术、人工智能等多种技术手段日益成熟，大体积混凝土施工技术势必呈现高速发展的态势，继而为我国水利水电工程建设提供技术支持。

参考文献：

[1] 张良.张集闸除险加固工程大体积混凝土温控防裂应用研究[J].山西建筑,2026,52(08):165-168+182.
 [2] 田浩,王腾飞,张琪.水利工程大体积混凝土施工温度控制技术的现场应用与优化研究[J].水泥,2026,(04):96-99.
 [3] 陈刚,于群.高含砂混凝土在水利工程大体积结构中的施工工艺优化[J].水利技术监督,2026,(04):290-293.
 [4] 杨婉朋,杨发智,刘俊昌.水利工程给排水蓄水池大体积混凝土施工温控防裂技术研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(02):416-418.
 [5] 张永新.水利工程施工中大体积混凝土温控技术研究[J].水上安全,2026,(03):100-102.