

水闸工程大体积混凝土温控防裂施工技术研究

李志磊

(中铁八局集团建筑工程有限公司, 四川 成都 611731)

摘 要 水闸工程中大体积混凝土施工普遍面临水化热导致的温度裂缝问题, 严重影响结构的耐久性与安全性。本文结合多个水电站大坝及泄洪闸工程实践, 系统研究水闸大体积混凝土温度裂缝成因及控制技术体系。通过优化配合比设计、布设智能冷却水管系统、实施全过程温度监测与智能养护, 构建“材料—温控—施工”一体化防裂技术方案, 旨在为同类水闸工程提供技术参考。工程应用表明, 采用钙镁复合型膨胀剂可使水化热峰值降低 40%, 智能温控系统可实现内外温差动态调控在 25℃ 以内, 有效防止有害裂缝产生。

关键词 水闸工程; 大体积混凝土; 温度裂缝; 智能温控

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.020

0 引言

水闸工程中闸室底板、还有闸墩等结构构件尺寸, 通常会超过 1 m, 属于大体积的水泥混凝土。水泥水化热会让内部温度急剧提升, 和表面形成温差, 当温度应力超过水泥抗拉强度时便生成裂痕, 特别是严重作用结构持久性以及运作安全。据现有统计, 建成水闸工程中超过 60% 的结构裂痕和温度应力有着直接关联^[1]。随着内河航运快速发展, 金沙江乌东德水电站、黄河小浪底水利枢纽等重大工程相继建设, 普遍会遇到水泥方量大、结构复杂, 温度控制需求高的情况。传统经验性防控措施存在温度控制精确度低、养护效能差, 以及裂痕控制效果不稳定等问题。本文借助多个水电站及拦河闸工程实践, 系统论述配合比改善、智能降温、温度监测、智慧养护等核心技术的融合运用, 形成水闸大容积水泥温度控制防裂技术体系, 并结合实测数据验证技术效果。

1 温度裂缝成因及控制机理

1.1 温度场演化规律

大容积水泥浇筑后, 温度改变依旧会经历升温期、减温期以及稳按期三个时期。升温期发生在浇筑后 1~3 天, 水泥水化反应很激烈释放热量, 内部温度快速上升至峰值; 减温期热量逐渐朝外释放, 而温度缓慢缩减; 稳按期水泥温度以及外界环境动向于均衡。水闸结构体型很复杂, 底板、闸墩、输水廊道等部位厚薄差别很大, 特别是闸墩中部温度极值可达 50~60℃, 边沿以及廊道周围温度斜坡大, 很容易生成表面裂痕。

1.2 温度应力形成机制

温度应力源于混凝土热胀冷缩与约束条件共同作用。水闸底板坐落在岩石或桩基上而受强约束, 降温收缩产生拉应力; 闸墩中部受底板和老混凝土约束, 侧向自由, 拉应力集中在约束部位。温度应力分为内外温差引起的表面应力和整体降温受基础约束产生的贯穿性拉应力。工程统计显示, 内外温差超过 25℃ 时表面开裂风险显著增加, 降温速率超过 3℃/d 或降温幅度超过 30℃ 时贯穿性裂缝风险急剧上升^[2-3]。

1.3 防裂控制机理

温控防裂核心机理是“降峰值、减梯度、控速率”。降峰值指通过材料优选和冷却措施降低混凝土最高温升, 每降低 5℃ 温度应力可降低 15%~20%; 减梯度指控制内外温差和上下层温差, 避免局部温度应力集中; 控速率指延缓降温速率, 发挥混凝土徐变松弛效应降低拉应力。从材料层面, 掺加粉煤灰、矿粉可降低水化热, 掺加膨胀剂可补偿降温收缩; 从施工层面, 控制浇筑温度、设置冷却水管、加强保温养护是有效手段。

2 温控防裂技术体系

2.1 配合比优化设计

配合比优化是降低水化热的关键, 主流技术路线遵循“三低一高一掺”: 低砂率、低坍落度、低水胶比、高粉煤灰掺量、掺高效减水剂。新型材料应用取得突破性进展(见表 1)。

钙镁复合型膨胀剂利用钙矾石与氢氧化镁的双重

作者简介: 李志磊(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程施工。

表 1 典型水闸工程混凝土配合比优化方案对比

工程名称	胶凝材料组成 (kg/m³)	水胶比	外加剂	温升控制效果	28d 强度 (MPa)
新疆大石峡水利枢纽工程	水泥 200+ 粉煤灰 80+ 钙镁复合膨胀剂 25	0.42	聚羧酸减水剂 1.2%	峰值降低 40%	38.5
黄河小浪底水利枢纽	水泥 180+ 锂渣粉 90+ 矿粉 30	0.38	高效减水剂 1.5%	峰值降低 32%	42.3
金沙江乌东德水电站	水泥 210+ 粉煤灰 70+ 矿粉 40	0.40	缓凝型减水剂 1.3%	峰值降低 28%	40.8

膨胀效应，在水化温升和降温收缩阶段分别提供补偿，实现全过程收缩补偿。新疆大石峡工程掺入 8%，水化热峰值降低 40%，28 d 收缩率降低 45%。

多聚糖类水化温升抑制剂可延缓水泥水化，使放热峰延迟约 10 小时。黄河小浪底工程在高温环境下应用，最高温升出现时间从 36 小时延迟至 48 小时，峰值温度降低 6℃。

锂渣粉替代粉煤灰实现固废资源化利用，其火山灰活性高。金沙江乌东德水电站掺入 20%，3 d 水化热降低 18%，28 d 强度提高 12%，抗氯离子渗透性提高 30%，每立方米节约成本 15～20 元。

2.2 智能冷却水系统

冷却水管是大体积混凝土内部降温主要手段。传统人工通水冷却存在流量控制粗放、水温调节滞后等问题。智能冷却水系统通过布设温度传感器和流量调节阀，实现冷却水流量和水温动态调控。

在冷水管材质方面，HDPE 管正逐渐把传统钢管替换掉。HDPE 管柔韧性好、连接简单、耐腐蚀，且跟混凝土粘结性好，能避免水沿管壁渗漏。金沙江乌东德水电站选用 HDPE 冷却水管，管径 32 mm，壁厚 2.5 mm，施工效率比钢管提高 3 倍多，优化冷水管布置后，把水管间距从 1.0 m 加密到 0.8 m，让闸墩内部最高温度降低 3.5℃。

智能温度控制系统的核心在于封闭循环掌控算法。系统会对混凝土内部温度进行即时采集，在把它同目标温度曲线对比之后，自动对冷水流量以及水温度实施调节，掌控目标设定为：升温期适宜通水带走热量以缩减极值；减温期需把减温速率掌控在不超过 2℃/d，黄河小浪底水利枢纽采用大体积混凝土智能温控系统，其内置 32 个温度采集通道以及 16 个流量掌控回路，实现远间距数据传输和水温度智能掌控。减温效率较传统方法提升 40%，能耗缩减 25%（见表 2）。

表 2 智能冷却系统与传统冷却方式效果对比

控制方式	温度控制精度	能耗水平	人工干预频率	裂缝控制效果
传统人工控制	±5℃	基准	每日 4～6 次	裂缝风险中等
智能自动控制	±1.5℃	降低 25%	每周 1 次巡检	裂缝率降低 80%

2.3 全过程温度监测

监测断面选在厚度最大、散热最差部位。闸墩布设 5～7 个测点，采用数字温度传感器，精度 ±0.5℃，采集频率 30 分钟/次。智能监测平台实现远程监控，具备实时显示、历史查询、超限报警功能。当内外温差超 22℃时自动推送预警。乌东德水电站布设 286 个测点，指导调整冷却流量 28 次。

2.4 智慧养护系统

养护是防止混凝土表面开裂的最后一道防线。传统人工洒水养护难以保证均匀性和连续性，尤其对于高差大、立面多的闸墩等部位。智慧喷淋养护系统通过自动化控制实现按需养护：温湿度传感器实时监测混凝土表面微气候，当表面温度与环境温差超过设定值或表面湿度低于阈值时，控制器自动开启对应区域

喷头进行喷雾养护，喷淋参数根据实时温差动态调整。乌东德水电站采用智能养护技术，闸墩立面喷淋系统养护覆盖率达 100%，养护用水量较传统方式节约 40%，养护人员减少 80%，拆模后闸墩表面平整光洁，未发现干缩裂缝。

3 工程应用与效果验证

3.1 典型工程概况

该技术体系在新疆大石峡、金沙江乌东德、黄河小浪底等多项工程中得到应用验证。黄河小浪底水利枢纽为大（1）型工程，大体积混凝土方量约 12 万 m³，采用封闭料仓控温、“三低一高一掺”配合比及片冰制冷、喷雾降温等全链条温控工艺，骨料温度控制在 28℃以下，出机温度控制在 25℃以内。金沙江乌东德水电站为 270 m 高混凝土双曲拱坝，总量超 60 万 m³，

创新研发智能温控云平台,集成温度监测、冷却控制及养护管理,实现温控全周期智能化管控^[4-5]。

3.2 温度监测数据分析

根据图 1 数据显示,选用温度控制措施后,闸墩混凝土内部最高温出现在浇筑后 48~60 小时,峰值约 52.3℃,表面温约 35.6℃,内外温差控制在 17.8℃内,远低于 25℃规范限值。降温阶段持续约 10 d,

平均降温速率约 1.8℃/d,并未出现温度骤降情况。

在传统施工条件下,闸墩混凝土内外温差常在 25~30℃,降温速率难以控制。某同类工程采用传统温控方法,核心最高温度 58.7℃,表面 32.4℃,内外温差 26.3℃,拆模后出现多条表面微细裂缝。采用智能温度控制后,温差波动幅度减少 60% 以上。金沙江乌东德水电站坝体核心最高温度 49.6℃,表面 31.2℃,

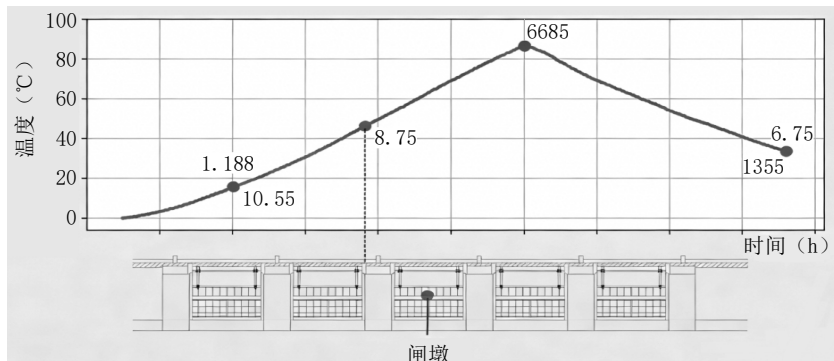


图 1 黄河小浪底水利枢纽泄洪闸墩温度历时曲线

内外温差 18.4℃,极值出现时间推迟至第 3.5 天,降温速率控制在 1.5℃/d 以内。

3.3 裂缝控制效果

黄河小浪底水利枢纽主体结构累计浇筑完成 65%,墙体表面平整光洁,未出现有害裂缝,抗渗等级达到 P10,较设计 P8 提高一级;抗冻等级达到 F150。金沙江乌东德水电站首仓混凝土浇筑后,经 28 d 龄期检测,未发现温度裂缝。新疆大石峡水利枢纽工程首坝坝基底板(16 m×23.4 m×1.5 m)浇筑 626 m³混凝土,采用智能温控技术后,底板内部温度场均匀,拆模后未见裂缝。后续浇筑的 12 块坝基底板和 8 个闸墩均未发现有害裂缝。温控防裂技术应用效果具体情况见表 3。

表 3 温控防裂技术应用效果统计

工程名称	控温目标	实测温差	裂缝情况	混凝土方量
黄河小浪底水利枢纽	≤ 25℃	17.8℃	无有害裂缝	12 万 m ³
新疆大石峡水利枢纽工程	≤ 25℃	19.2℃	无裂缝	8.5 万 m ³
金沙江乌东德水电站	≤ 25℃	18.5℃	无裂缝	15 万 m ³

4 结束语

本文建立的“材料—温控—施工”一体化技术体系,从材料配比调整、智能降温、温度监测、智能养护四个维度协同运作,实现了对水闸大体积混凝土温度裂

缝的有效防治。在新材料应用方面,新型复合膨胀材料可完成全过程收缩填补,水化热最高点削减 40%;工业废渣粉取代粉煤灰每立方米可节省成本 15~20 元;新型温升延缓剂可推迟水化放热峰值 10 小时。在智能温控技术方面,智能降温系统做到 ±1.5℃精度控制、能耗减少 25%,智慧养护系统节约用水 40%,全过程温度监测构成数据闭环。工程应用显示,使用该技术体系关键在于将混凝土内外温差稳定调控在 20℃内,从而有效避免有害裂缝出现。该技术在新疆大石峡水利枢纽工程、金沙江乌东德水电站、黄河小浪底水利枢纽等多个重大工程中成功应用,总计浇筑混凝土超过 120 万 m³,具有良好的推广价值。未来需进一步探究不同水闸结构温度变化规律,探寻人工智能算法在温度预测中的运用,并构建长期效果评估机制。

参考文献:

- [1] 郑以传.蜀山泵站大体积混凝土施工及温控防裂措施研究[J].大坝与安全,2025(05):81-84.
- [2] 温浩.水库主坝浇筑加固大体积混凝土防裂温控应用[J].云南水力发电,2024,40(03):82-86.
- [3] 常旭东,何鑫,孙西文.水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J].水泥,2025(09):116-119.
- [4] 申相水,耿莉,董昊雯.小浪底水利枢纽进水塔温度作用分析研究[J].中国农村水利水电,2006(09):84-88.
- [5] 赵宏,蒋智杰,周志华,等.乌议小浪底工程大体积混凝土的温度与裂缝控制[J].建筑科学,2000(04):50-52.