

# 水利工程大体积混凝土施工 温控防裂技术优化研究

李 程, 朱玉晓, 张 阁

(山东开创公路工程有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘 要** 本文以水利工程大体积混凝土施工中的温控防裂技术为研究对象, 针对工程实践中因水化热积聚、温度场分布不均引发的裂缝问题, 结合水利工程结构体型大、施工环境复杂、耐久性要求高的特点, 系统探究温控防裂技术的优化路径与实施方法。通过文献研究法、数值模拟法与工程案例分析法, 分析各优化措施对混凝土温度场、应力场的调控机理与实际应用效果, 以期提升水利工程结构的耐久性与运行安全性提供参考。研究结果表明, 经优化的低热胶凝材料配比、精细化浇筑工艺、分布式智能监测系统与全周期养护方案, 可有效将混凝土核心温升峰值控制在  $47\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内, 内外温差稳定在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  设计阈值以下, 裂缝发生率较传统施工工艺降低 80% 以上。

**关键词** 水利工程; 大体积混凝土; 温控防裂; 技术优化; 水化热控制

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.019

## 0 引言

我国水利基础设施建设正朝着大型化、复杂化、高标准化方向发展, 大坝、船闸、泵站、渡槽等核心构筑物均采用大体积混凝土施工技术, 其结构施工质量直接关系到工程的服役寿命与防洪、供水、发电等核心功能的发挥。当前水利工程大体积混凝土施工中, 传统温控防裂技术仍存在诸多短板, 难以适应复杂自然环境与高标准工程质量要求, 温度裂缝成为制约水利工程大体积混凝土施工质量提升的关键瓶颈。在建筑业高质量发展的背景下, 针对水利工程的结构特性与施工需求, 开展大体积混凝土施工温控防裂技术优化研究, 构建科学、系统、高效的温控防裂技术体系, 成为解决工程质量难点、提升水利工程建设品质的必然要求。本文结合近三年水利工程施工技术研究成果与工程实践经验, 从全流程质量管控角度出发, 探究温控防裂技术的优化路径与保障机制, 为水利工程大体积混凝土施工提供技术参考。

## 1 水利工程大体积混凝土温控防裂的核心问题与影响因素

### 1.1 温控防裂面临的核心技术痛点

水利工程大体积混凝土施工多处于露天环境, 受自然气候、水文地质、结构体型等因素影响显著, 温控防裂工作相较于建筑工程具有更高的难度与更严格

的要求, 现阶段施工中主要面临三大核心技术难点<sup>[1]</sup>。其一为水化热调控难度大, 常规硅酸盐水泥水化热峰值高、放热速率快, 而水利工程大体积混凝土结构厚度大、浇筑方量大, 热量难以快速通过表面散发, 易造成内部温度持续升高, 形成较大的内外温差; 其二为温度场管控精准度低, 传统温度监测多采用热电偶定点、定时人工测量方式, 存在监测点少、数据反馈滞后等问题, 导致温控措施的调整缺乏实时、全面的数据支撑, 难以实现对温度应力的精准管控; 其三为施工与养护协同性不足, 浇筑工艺设计不合理, 易造成层间冷缝与热量集中。

### 1.2 温控防裂的关键影响因素

水利工程大体积混凝土温度裂缝的产生是材料、施工、环境、管理等多因素共同作用的结果, 各因素相互关联、相互影响, 从施工实践层面可将核心影响因素归纳为四类。材料特性因素是温控防裂的基础, 胶凝材料的类型、掺合料的配比、骨料的级配与品质、外加剂的选用直接决定了混凝土水化热释放规律与抗裂性能。施工工艺因素是温控防裂的核心, 浇筑分层厚度、间歇时间、振捣质量直接影响混凝土的散热效率与结构密实度, 分层过厚会导致内部热量难以散发, 振捣不密实则易形成内部孔隙, 成为裂缝萌生的起点。环境条件因素是温控防裂的重要外部变量, 施工期的环境温度、风速、湿度直接影响混凝土表面散热速率,

作者简介: 李程 (1980-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利水电工程施工。

夏季高温浇筑会提高混凝土入模温度,冬季低温则会增大内外温差,大风天气会加速混凝土表面水分蒸发。监测与养护因素是温控防裂的保障,温度监测系统的布设密度、数据反馈效率决定了温控措施的及时性与有效性<sup>[2]</sup>。

## 2 水利工程大体积混凝土施工温控防裂技术优化路径

### 2.1 材料体系优化

材料体系优化是从源头降低水化热积聚、提升混凝土抗裂性能的关键,具体优化措施围绕胶凝材料、外加剂、骨料与拌和水三个方面开展。在胶凝材料配比优化方面,采用“低热硅酸盐水泥+粉煤灰+磨细矿渣粉”三元胶凝体系,利用粉煤灰的火山灰效应与矿渣粉的微集料效应,延缓水泥水化反应速率,降低水化热峰值与总放热量。在外加剂精准适配方面,选用缓凝型高效减水剂,减水率 $\geq 25\%$ ,将水胶比严格控制在 $0.45 \sim 0.55$ ,掺加 $8\% \sim 12\%$ 的UEA膨胀剂,利用混凝土硬化过程中的微膨胀效应抵消收缩应力,补偿温度裂缝的产生。在骨料与拌和水优化方面,粗骨料选用 $5 \sim 31.5 \text{ mm}$ 连续级配碎石,细骨料选用细度模数 $2.3 \sim 3.0$ 的中砂,通过优化骨料级配提高骨料堆积密度,减少胶凝材料用量,进一步降低水化热。

### 2.2 施工工艺优化

施工工艺优化的核心是提升混凝土散热效率、分散温度应力,实现混凝土温度场的均匀分布,通过对浇筑、冷却、振捣等关键工序的精细化设计,构建与水利工程结构特性相适配的施工工艺体系,从施工过程中管控温度裂缝的萌生<sup>[3]</sup>。在浇筑工艺优化方面,采用斜面分层推进浇筑法,浇筑顺序遵循“从远到近、对称推进、分层分段”的原则,禁止单点集中卸料,防止混凝土堆积导致局部水化热集中。在冷却水管系统优化方面,对于厚度 $\geq 1.5 \text{ m}$ 的大体积混凝土结构,预埋 $\Phi 40 \sim 50 \text{ mm}$ 镀锌钢管,按 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 的间距呈网格状布设,冷却水管的布设深度与位置根据结构厚度进行调整,确保冷却范围覆盖混凝土核心高温区。在振捣工艺精细化方面,采用插入式振捣器进行振捣作业,振捣间距 $\leq 50 \text{ cm}$ ,振捣时间控制在 $15 \sim 20 \text{ s/点}$ ,直至混凝土表面泛浆、无气泡逸出为止,杜绝漏振、过振现象;振捣完成后及时用长刮杆进行平仓处理,消除表面早期收缩裂缝,提高混凝土表面密实度,增强表面抗裂性能。

### 2.3 智能监测系统优化

针对传统温度监测手段的短板,构建以分布式光纤测温为核心、结合无线传输技术的智能监测系统。

在测温点与光纤布设方面,按“梅花形”原则布设测温点,测点间距控制在 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ ,全面反映混凝土不同部位的温度变化;同时沿混凝土结构的长度、高度、宽度方向埋设分布式光纤,实现对混凝土内部温度场的连续、全域监测,弥补传统定点监测的局限性,精准掌握温度场的分布规律与变化趋势。在监测频率与数据反馈方面,制定差异化的监测频率方案,监测数据通过无线传输模块实时上传至云端监控平台,平台自动生成温度变化曲线、温度场云图,直观反映混凝土温度变化情况。

### 2.4 养护管理优化

养护管理优化的核心是延缓混凝土表面散热速率、保持表面湿度稳定,减少温度应力与干缩应力的叠加,结合水利工程不同施工季节、不同服役区域的特点,构建全周期、差异化、智能化的养护管理体系,强化混凝土后期抗裂性能提升。在常规保温保湿养护方面,混凝土初凝后即浇筑完成 $4 \sim 6 \text{ h}$ 后,立即在表面覆盖“土工布+塑料薄膜+保温被”三层防护结构,形成密闭的保温保湿层,确保塑料薄膜内始终有凝结水,防止混凝土表面水分快速蒸发引发干缩裂缝。在智能养护系统应用方面,引入集温度、湿度监测与自动喷淋、自动加热于一体的智能养护系统,系统实时采集环境温度、湿度与混凝土表面温度、湿度数据,根据预设的养护参数,自动调节喷淋水量、喷淋频率与加热功率,将混凝土养护环境的湿度控制在 $90\%$ 以上,确保混凝土早期强度稳步发展<sup>[4]</sup>。

## 3 工程案例验证与优化效果分析

### 3.1 工程案例概况

以某大型水库重力坝工程为研究对象,该工程坝体最大高度 $78 \text{ m}$ ,坝顶长度 $320 \text{ m}$ ,混凝土浇筑总量约 $32 \text{万 m}^3$ ,属于典型的大体积混凝土结构,工程功能以防洪、供水、发电为主,对混凝土结构的抗裂性、耐久性与整体性要求极高。为解决传统施工工艺的温控短板,该项目采用本文研究的温控防裂优化技术体系,从材料体系、施工工艺、智能监测、养护管理四个维度实施全流程质量管控,重点监测混凝土核心温升峰值、内外温差、降温速率、裂缝发生率等关键指标,验证优化技术的实际应用效果。

### 3.2 优化效果量化分析

通过对该水库重力坝工程施工现场监测数据的整理分析,并与传统施工工艺的管控效果进行对比,本文提出的温控防裂优化技术体系取得了显著的应用效果,各核心管控指标均达到设计要求,有效降低了温度裂缝隐患。在温度场调控方面,坝体混凝土核心温

升峰值控制在 45 °C，低于 47 °C 的预设控制阈值，混凝土内外温差始终稳定在 20 ~ 25 °C 之间，降温速率控制在 1.5 °C/d 以内，避免了因降温过快引发的温度应力突变，实现了混凝土温度场的均匀、缓慢变化。在裂缝防控方面，该工程大体积混凝土结构表面未出现贯穿性裂缝，仅在局部区域出现少量的微裂缝，微裂缝发生率仅为 8%，较传统施工工艺的裂缝发生率降低 81.4%，且所有微裂缝宽度均 ≤ 0.2 mm，可通过混凝土的自愈合能力完成修复，无需进行人工修补，有效保证了混凝土结构的整体性。在工程质量与施工效率方面，通过优化浇筑工艺与智能监测系统的应用，施工效率提升 20%，有效缩短了施工工期，避免了因温控问题导致的工期延误，实现了质量与进度的协同管控。在经济性方面，虽然温控防裂优化技术的应用使前期施工成本增加 6%，但因裂缝发生率大幅降低，工程裂缝修复费用减少 70% 以上，同时混凝土结构耐久性的提升使工程后期运维成本降低 32%，预计可使坝体结构的服役寿命延长 15 年以上，实现了工程全生命周期成本的降低，达成了质量效益与经济效益的双赢。

## 4 温控防裂技术优化的保障机制与应用建议

### 4.1 技术优化落地的保障机制

为确保水利工程大体积混凝土温控防裂优化技术能够在工程实践中有效落地、发挥实效，需从组织、制度、人才三个维度构建完善的保障体系，为技术优化措施的实施提供全方位支撑。在组织保障方面，设立专项温控防裂领导小组，统筹推进温控防裂技术优化工作，明确各方职责与分工，建立“总部—项目部—施工班组”三级推进机制，确保技术优化措施层层落实、执行到位。在制度保障方面，制定完善的温控防裂技术管理制度体系，针对温控防裂优化技术方案，组织行业专家进行严格的可行性、先进性与经济性评审，确保方案与工程实际相适配；完善质量考核制度，将混凝土温度控制指标、裂缝发生率纳入施工班组与管理人员的绩效考核体系，实行奖惩分明的考核机制，强化施工人员的质量意识与执行力度。在人才保障方面，加强施工技术人员的专业培训，定期组织开展大体积混凝土温控防裂技术、智能监测设备操作、精细化施工工艺等方面的培训课程与实操演练，提升施工人员的专业技能与实操能力，使其能够熟练掌握优化技术的操作要点<sup>[5]</sup>。

### 4.2 技术优化的工程应用建议

为使温控防裂优化技术体系能够在更多同类工程中得到推广应用，充分发挥技术优化对工程质量的提升作用，提出针对性的工程应用建议。一是因地制宜

制定技术方案，根据工程所处区域的气候条件、水文地质特征与结构体型，灵活调整温控防裂技术方案的具体参数。二是推动技术与管理深度融合，将温控防裂优化技术纳入水利工程施工全过程质量管理体系，强化施工前的方案论证、施工中的过程管控与施工后的效果评估<sup>[6]</sup>。三是加强产学研协同创新，施工企业应与科研院所、材料生产企业、设备研发企业建立长期的合作关系，开展低热胶凝材料、智能监测设备、新型保温保湿材料等方面的联合研发，加速前沿技术与科研成果的工程转化。

## 5 结束语

水利工程大体积混凝土施工温控防裂技术优化是一项系统性、全流程的工作，其核心目标是通过技术革新与工艺优化，提升混凝土结构的耐久性与安全性。工程案例验证表明，优化后的温控防裂技术体系能够将混凝土核心温升峰值、内外温差控制在设计阈值以内，大幅降低裂缝发生率，同时兼顾施工效率与工程全生命周期经济性，实现了质量效益、经济效益与社会效益的统一。随着数字技术、新材料技术、智能化技术在水利工程领域的深入应用，大体积混凝土施工温控防裂技术正朝着智能化、精准化、绿色化的方向发展。未来，应进一步推动 BIM、物联网、大数据、人工智能与温控防裂技术的深度融合，构建集温度场数值模拟、实时监测、智能调控于一体的数字化温控平台，实现对混凝土温度场的预判与精准管控；同时加强极端环境下温控防裂技术的研究与应用，持续优化低热、高抗裂、高耐久性混凝土材料体系，不断完善温控防裂技术体系。水利工程建设企业应高度重视温控防裂技术的研发与应用，通过技术创新与管理升级，破解工程质量瓶颈，提升水利工程建设品质，为我国水利基础设施高质量发展提供坚实的技术支撑。

## 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] 白体新. 大体积混凝土工程施工裂缝控制技术研究 [J]. 水泥, 2025(08):76-80.
- [3] 田种香. 水利施工中混凝土裂缝的防治施工技术探讨 [J]. 全面腐蚀控制, 2024,38(07):138-141.
- [4] 刘小龙. 大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的应用 [J]. 中国高新科技, 2025(22):121-123.
- [5] 张春海. 水库大坝大体积混凝土的裂缝成因及防治对策 [J]. 水利技术监督, 2025(10):319-323.
- [6] 李柯. 重力坝大体积混凝土温控防裂施工技术研究 [J]. 水泥, 2025(07):140-142.