

# 高坝施工中混凝土温度控制与防裂措施优化

刘培江

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710116

**摘要:** 高坝大体积混凝土施工, 水化热集聚易引发内外温差过大, 进而产生温度裂缝, 威胁坝体结构安全与使用寿命。本文分析了混凝土温度裂缝的产生机理、主要诱因及危害, 指出传统温控防裂措施存在的粗放管控、适配性不足等问题, 围绕原材料选型、配合比设计、施工管控、养护保温、实时监测五大方面, 提出针对性优化方案, 实现全过程精细化温控, 有效抑制裂缝产生, 提升高坝施工质量与结构耐久性, 保障工程长期稳定运行。

**关键词:** 高坝施工; 混凝土; 温度控制; 防裂措施优化

**引言:** 水利水电高坝工程体量庞大, 大体积混凝土浇筑是核心施工环节, 温度裂缝是最常见的质量通病。这类裂缝会破坏坝体整体性, 引发渗漏、应力集中等问题, 严重时会影响工程安全运行。随着工程建设标准不断提高, 传统温控防裂手段难以满足高质量施工要求。本文结合工程实际, 深入探究温度裂缝成因, 梳理现有防控手段的缺陷, 优化温控防裂措施, 为同类高坝混凝土施工提供可靠的技术支撑与实践参考。

## 1 高坝施工中混凝土温度裂缝成因及温控机理分析

### 1.1 混凝土温度裂缝类型及特征

(1) 表面裂缝与深层裂缝成因区分。表面裂缝多因混凝土内外温差过大形成, 浇筑初期水泥水化放热使内部温度骤升, 表层受低温环境影响快速降温, 产生过大拉应力, 超出混凝土抗拉强度便开裂, 这类裂缝窄而浅。深层裂缝是内外温差持续累积, 加上基础约束作用, 应力向内部延伸所致, 裂缝深度更大, 若管控不及时, 极易持续扩展。(2) 贯穿裂缝形成机理及危害。贯穿裂缝由深层裂缝不断发展、贯通结构体形成, 主要是混凝土受强约束, 内部温度应力长期超标, 拉应力贯穿整个构件。这类裂缝会破坏高坝结构整体性, 损坏防渗体系, 引发渗漏、溶蚀问题, 降低结构承载力和稳定性, 严重危及大坝安全运行。(3) 不同施工阶段裂缝诱发因素差异。浇筑初期, 水化热集中释放、温度骤升是主因; 升温降温过渡期, 内外温差悬殊、气温突变易诱发裂缝; 后期养护阶段, 干燥收缩与降温收缩叠加, 再加上荷载约束, 会催生新裂缝或扩大原有裂缝<sup>[1]</sup>。

### 1.2 混凝土温度应力产生机理

(1) 水化热温升与温度场分布规律。水泥水化反应释放大量热量, 混凝土浇筑后短时间内内部温度快速攀升, 形成中心温度高、表层温度低的不均匀温度场。大体积高坝混凝土散热缓慢, 内部温升峰值高、持续久,

温度分布不均问题尤为突出。(2) 内外温差、基础温差对应力的影响。内外温差过大会让混凝土表层受拉、内部受压, 产生温度应力; 基础约束限制混凝土变形, 基础温差越大, 约束应力越强, 拉应力随之飙升, 远超混凝土抗拉极限后, 裂缝便会产生。(3) 混凝土收缩变形与应力叠加效应。混凝土硬化过程中会发生干燥收缩、降温收缩, 收缩变形受约束后产生收缩应力, 与温度应力相互叠加, 大幅提升总应力值, 进一步加大裂缝产生风险。

### 1.3 温控防裂核心控制指标

(1) 允许最高温度控制标准。结合高坝混凝土强度等级、坝体部位, 设定内部最高温度限值, 严控温升峰值, 从源头减少温度应力, 防止温度超标引发裂缝。(2) 温差控制阈值与降温速率要求。严控内外温差、基础温差, 不得超过规范阈值, 同时管控降温速率, 防止降温过快产生过大应力, 保证混凝土均匀缓慢降温。(3) 混凝土抗裂性能关键指标。以抗拉强度、极限拉伸值为核心指标, 提升混凝土自身抗裂能力, 抵消部分温度应力, 增强结构防裂性能。

### 1.4 裂缝影响因素综合分析

(1) 原材料性能对裂缝的影响。水泥水化热大小、骨料级配、外加剂性能, 直接影响温升速度与收缩变形, 选用低热水泥、优质骨料, 能有效减少裂缝诱因。(2) 施工工艺与环境条件影响。浇筑分层厚度、振捣质量、养护时长, 以及气温、风速、降水等环境因素, 都会影响温度变化与应力发展, 规范施工、做好防护能降低开裂风险。(3) 结构设计与约束条件影响。坝体分缝分块、结构断面设计, 以及基础约束强弱, 决定混凝土变形空间, 合理设计能释放温度应力, 减少约束开裂。

## 2 高坝施工中混凝土温度控制现有措施及短板分析

### 2.1 原材料优选与配合比优化措施

(1) 低热水泥及掺合料选用现状。当前高坝施工普遍选用低热硅酸盐水泥,降低水泥水化放热峰值,同时掺入粉煤灰、矿渣粉等活性掺合料,替代部分水泥,进一步减少水化热总量,延缓温升速度,缓解内部温度骤升问题,是源头温控的基础手段。(2) 骨料级配与外加剂应用情况。施工中多采用连续级配骨料,优化骨料颗粒搭配,减少胶凝材料用量,降低水化热释放。同时搭配缓凝剂、减水剂等外加剂,改善混凝土和易性,延长凝结时间,分散胶凝材料颗粒,提升水化热均匀度,辅助控制内部温升<sup>[2]</sup>。(3) 现有配合比温控效果局限性。现有配合比多按常规工况设计,针对高寒、高温等特殊环境适配性差,过度依赖掺合料易降低混凝土早期强度,反而增加开裂风险。配合比微调缺乏动态调整机制,难以贴合不同坝段、不同施工时段的温控需求,温控效果存在上限。

## 2.2 施工过程温控措施

(1) 混凝土出机及入仓温度控制。常规做法为骨料预冷、冰水拌合、罐车保温运输,严控混凝土出机温度,入仓前搭设遮阳棚,避开高温时段施工,减少外界高温对混凝土温度的影响,降低初始入仓温度。(2) 预埋冷却水管通水冷却工艺。在坝体内部预埋循环冷却水管,分初期、中期、后期通水冷却,带走内部水化热,降低混凝土内部温度,缩小内外温差。但通水流量、水温控制多依靠人工经验,缺乏精准调控手段。(3) 浇筑层厚、间歇期控制方式。施工中严格限定浇筑层厚度,缩短分层浇筑间歇期,加快散热速度,避免单层混凝土过厚导致热量堆积。但实际施工中常受工期压力影响,层厚超标、间歇期缩短现象频发,削弱温控效果。

## 2.3 混凝土表面保温与养护措施

(1) 常规保温材料及铺设方式。常用保温被、保温棉、聚苯板等材料,覆盖混凝土外露表面,减少表层热量散失,缩小内外温差。多采用人工铺设方式,覆盖密度和贴合度参差不齐,保温效果不均。(2) 养护时长与养护工艺现状。常规养护以洒水保湿、覆盖保温为主,养护时长多按规范下限执行,早期养护力度不足。养护工艺偏传统,缺乏全程保湿保温联动手段,混凝土收缩变形难以有效抑制。(3) 极端天气下保温养护不足。面对寒潮、强风、暴雨等极端天气,现有保温养护措施响应滞后,保温层加固不及时,易造成混凝土表面温度骤降,产生巨大拉应力,诱发表面裂缝甚至深层裂缝<sup>[3]</sup>。

## 2.4 现有温控措施存在的问题

(1) 温控措施针对性不强,精细化不足。多数项目采用统一温控方案,未结合坝体部位、施工时段、环

境气候做差异化设计,措施流于形式。温控参数把控粗放,缺乏精准量化管控,难以适配复杂施工工况。(2) 冷却与保温工艺衔接不到位。内部通水冷却和表面保温各自独立作业,冷却速率和保温力度不匹配,易出现温差波动过大问题。前期降温过快、后期保温滞后,加剧应力失衡,提升开裂风险。(3) 质量监控与动态调控缺失。温控监测多以人工定点检测为主,数据反馈滞后,缺乏实时在线监控系统。无法根据温度变化动态调整通水、保温参数,被动应对裂缝风险,事前防控力度薄弱。

## 3 高坝施工中混凝土温度控制与防裂措施优化方案

### 3.1 原材料与配合比优化

(1) 低热高性能混凝土配合比设计。推行低热高性能混凝土配比设计,以低热水泥为基材,复掺粉煤灰、矿渣微粉等活性掺合料,减少水泥用量,降低水化热峰值与放热速率,从源头削弱温度应力。针对坝体基础约束区、主体区等不同部位,定制专属配合比,兼顾强度、耐久性与抗裂性,提升混凝土极限拉伸值,降低收缩变形。通过室内温升试验与力学性能检测,确定胶凝材料、掺合料最优配比,避免热量集中释放,实现温升平缓、降温均匀,筑牢温控防裂基础。(2) 骨料预冷、水泥降温改良措施。改良骨料预冷工艺,采用风冷+水冷双重预冷模式,严控骨料初始温度,清除内部积热,阻断热源带入。搭建专用水泥降温库房,配备强制通风散热设备,控制水泥储存温度,避免高温水泥影响拌合料温度。物料堆放区搭设密闭遮阳棚,配套喷淋降温、除湿装置,减少外界高温传导,全面降低混凝土拌合初始温度,压低收入温度基数,减轻后期温控压力<sup>[4]</sup>。(3) 外加剂优选与掺量精准控制。优选缓凝高效减水剂、抗裂膨胀剂等复合型外加剂,改善混凝土和易性,延长初凝时间,细化内部结构,增强抗裂能力。摒弃粗放式掺加方式,建立外加剂定量掺加体系,根据环境温度、施工时段微调掺量,杜绝过量或不足。通过试验确定最佳掺量区间,实行精准计量投放,在不降低混凝土性能的前提下,进一步减少水化热,抑制收缩开裂。

### 3.2 施工全过程温控工艺优化

(1) 分层分块浇筑优化设计。结合坝体结构与基础约束强度,科学优化分层分块方案,合理减小浇筑层厚度,加快内部热量散发。严控分块尺寸与分缝间距,避开应力集中区域,释放约束应力,给混凝土预留充足变形空间。严格把控浇筑间歇期,确保下层混凝土充分降温后再进行上层施工,防止热量堆积。规范浇筑顺序,采用平铺法均匀浇筑,避免局部高温区形成,保证仓面温度均衡。(2) 冷却水管布置与通水动态调控。优化

冷却水管网布置,加密厚大部位、强约束区管路间距,消除温控死角,实现全域均匀冷却。推行分阶段动态通水管控,初期通水压制温升峰值,中期通水平稳降温,后期通水稳定温差。依据实时温度数据,灵活调整通水流量、水温与时长,严控降温速率,防止降温过快产生拉应力。加强管路防护,避免施工破损,保障通水循环通畅,实现内部温度精准调控。(3)高温、低温季节专项温控方案。高温季节避开日间高温时段,选用夜间凌晨施工,加强仓面遮阳、喷淋降温,缩短混凝土暴露时间,严控入仓温度。低温季节及寒潮天气,延长拆模时间,封闭施工仓面,做好防风保温,防止表面温度骤降。提前预判气温突变,提前启动防护措施,严控内外温差。针对季节交替期,制定过渡温控细则,应对温度波动,消除季节温差带来的开裂隐患。

### 3.3 防裂与养护措施升级

(1)复合型保温防护体系应用。搭建多层复合型保温体系,采用保温棉、防风膜、保温被组合材料,全覆盖贴合混凝土表面,封堵缝隙死角,提升保温防风效果。对廊道周边、坝体边角等薄弱部位,加厚保温层,强化局部防护,缩小内外温差,防止表层骤冷开裂。根据气温变化,灵活调整保温层厚度,实现温差动态管控。(2)全程保湿保温养护工艺改进。推行全程保湿保温一体化养护,混凝土初凝后立即启动养护,延长养护周期,覆盖升温、降温全阶段。采用喷雾保湿+覆盖保温联动工艺,保持表面湿润,抑制干燥收缩,同时锁住热量,维持温度平稳。落实专人定岗养护,全程巡查修补,杜绝养护缺位,保障养护效果。(3)早期防裂增强技术措施。在混凝土表层掺入抗裂纤维,提升早期抗拉强度,抵御温度应力。合理布设诱导缝、应力释放槽,分散集中应力,防止裂缝扩展。严控拆模时间与顺序,拆模后立刻覆盖保温,避免外力扰动损伤混凝土,守住早期防裂防线<sup>[5]</sup>。

### 3.4 温控监测与信息化管控

(1)温度、应力实时监测系统布置。在坝体内部、表层、关键约束区,密集布置温度、应力传感器,覆盖

全坝段、全浇筑层,构建全方位实时监测网络。精准采集混凝土内部温度、表层温度、温差、应力数据,全程记录温控全过程,消除人工监测盲区与滞后性,保证数据真实、完整、实时可查。(2)动态预警与应急调控机制。设定温差、降温速率、应力预警阈值,建立多级预警机制,一旦数据超标,立即发出声光预警,快速推送预警信息。配套制定应急调控方案,预警后及时调整通水流量、加厚保温层、延长养护时间,快速化解风险,遏制应力超标,防止裂缝萌生,实现被动防控向主动预警转变。(3)数字化温控管理平台搭建。搭建一体化数字化温控管理平台,整合监测数据、施工参数、温控措施等信息,实现数据实时上传、智能分析、可视化展示。平台具备数据统计、趋势预判、智能调控功能,管理人员可远程查看温控状态,精准下达指令,实现全过程信息化、精细化管控,提升温控效率与防裂精准度,保障高坝结构质量安全。

### 结束语

高坝混凝土温度控制与防裂是一项系统性工作,关乎工程整体质量。只有做好源头把控、过程管控、后期养护全流程管理,才能有效规避裂缝风险。经过优化的温控防裂措施,更贴合现场施工工况,防控效果更显著。施工过程中,要严格执行优化方案,做好动态监测与灵活调整。后续可进一步推广智能化温控技术,提升施工精细化水平,让高坝工程更安全、更耐用。

### 参考文献

- [1]林安宝.路桥工程项目中大体积混凝土温控防裂技术应用研究[J].时代汽车,2025,18(7):196-198.
- [2]杨修.大体积混凝土在大坝施工中的温控与防裂技术研究[J].中国水能及电气化,2025,9(2):19-28.
- [3]李柯.重力坝大体积混凝土温控防裂施工技术研究[J].水泥,2025,25(7):140-142.
- [4]胡洁.大坝混凝土温控防裂措施优化技术研究[J].水上安全,2025,19(10):193-195.
- [5]杨霖,董玮.大体积混凝土温控防裂技术研究[J].四川建筑,2025,45(2):229-231.