

水利工程水库大坝混凝土温控抗裂优化设计及配套施工关键技术研究

苏 浩 李 芮

山东中鲁技术服务集团有限公司 山东 菏泽 274000

摘 要：针对库区温差大、坝基约束强导致大坝混凝土易产生温度裂缝的工程问题，本文以水库大坝大体积混凝土为研究对象，划分表面、深层、贯穿三类温控裂缝，从材料、结构、环境、施工剖析裂缝成因。从结构构造、原材料配合比两大维度开展温控抗裂优化设计，优化坝体分缝、冷却水管布设参数，定制分区低热抗裂混凝土配比，配套研发拌合控温、分层浇筑、梯度通水、表层防护专项施工工艺，搭建全周期智能温控监测体系，分级预警温差风险并动态调整施工参数。研究形成适配本工程的温控抗裂成套技术，可有效管控坝体内外温差与降温速率，降低混凝土开裂风险。

关键词：水库大坝；混凝土；裂缝分类；温控抗裂；优化设计；施工关键技术

引言：现阶段中小型水库大坝多采用大体积现浇混凝土结构，水泥水化放热集中，加之库区昼夜温差、寒潮天气频发，坝基岩体刚性约束较强，现场施工极易出现各类温度裂缝，不仅破坏坝体防渗性能，还会缩减结构服役年限。现有温控设计多采用统一标准，未结合坝体分区差异化管控，传统通水、养护施工工艺粗放，温控管控效果较差。基于此，结合本水库地质气候条件，立足结构优化、材料改性、现场施工、智能监测全流程开展研究，整改现有温控施工短板，制定适配本工程的优化方案与施工工艺，解决大坝混凝土温控抗裂施工痛点，保障坝体结构长期稳定性。

1 大坝混凝土裂缝分类及成因

1.1 大坝混凝土温控裂缝类型及特征

结合水库大坝现场运维及施工验收标准，依托裂缝深度、延展范围、危害等级，将坝体温控类裂缝划分为表面裂缝、深层裂缝、贯穿裂缝三类。表面裂缝发育深度一般小于30cm，多分布坝体迎水面、坝顶、边角外露区域，形态细碎、走向无规律，多由昼夜温差、表层保温不到位引发，仅破坏混凝土表层保护层，结构受力影响较小。深层裂缝深度介于30cm至坝体半厚之间，大多竖向延伸，多出现于坝基约束区、孔洞周边应力集中位置，会破坏坝体局部整体性，削弱结构防渗能力。贯穿裂缝贯通坝体上下游截面，受基底强约束、整体降温收缩共同作用形成，直接割裂坝体受力结构，极易造成坝体渗水、结构失稳，属于大坝一级危害性裂缝，也是温控抗裂管控的核心防控对象。

1.2 坝体混凝土裂缝多维诱发成因分析

结合现场施工复盘，坝体裂缝并非单一因素导致，由材料、结构、环境、施工四类因素耦合作用形成。材料层面，水泥水化热偏高、砂石骨料含泥量超标、掺合料掺配比例不合理，会降低混凝土极限拉伸性能，提升开裂概率。结构层面，坝基岩体刚度大、新旧混凝土结合面约束强，坝体孔洞、转角位置应力集中，分缝布设不合理，放大温度收缩拉应力。环境层面，库区昼夜温差大、春秋寒潮极速降温、冬季低温冻害，快速拉大混凝土内外温差，诱发表层开裂。施工层面，骨料预冷不到位、浇筑分层厚度超标、通水冷却时序不合理、养护保温时长不足、仓面间歇期管控不严，是现阶段工地温控裂缝最主要人为诱因，也是本次施工技术优化的核心切入点^[1]。

2 水库大坝混凝土温控抗裂双重维度优化设计

2.1 水库大坝混凝土温控抗裂结构化优化设计

结构化优化以削弱基底约束、均衡坝体温度场、释放局部应力为核心目标，依托坝体分区受力仿真结果，具体优化要点如下：（1）坝体分区体型优化。按约束等级划分坝基强约束区、坝身弱约束区、坝顶自由区三段差异化体型，坝基0.2倍坝高范围强约束区，加厚坝体底部倒角，将直角边角改为半径1.2m圆弧倒角，消除边角应力集中；缩减约束区单块浇筑断面宽度，断面收坡坡度由原1:0.8调整为1:0.75，减小基底竖向约束力；坝顶外露区域增设压顶构造，加厚表层混凝土厚度至60cm，规避表层薄层混凝土温变速率过快问题。（2）坝体分缝构造优化。取消原设计加密竖向短缝，优化横缝间距，坝基区域横缝间距控制在18~20m，坝身中部横缝间距放宽

至22~24m;在孔洞周边、新旧混凝土结合面增设浅槽式诱导缝,诱导缝开槽深度12cm,间距8m,定向释放温度收缩应力;调整后浇带布设位置,避开坝体最大应力截面,后浇带宽度统一2m,间隔45d错峰浇筑,弱化新旧混凝土结合拉应力。(3)预埋冷却水管系统优化。摒弃传统等距平铺布管模式,分区调整水管参数,强约束区采用DN40高密度聚乙烯水管,层间距1.5m,管距1.8m;坝身主体采用DN32水管,层间距2.0m,管距2.2m;水管距坝体表层距离固定1.2m,避免表层通水造成内外反向温差;水管接头统一采用承插防渗接头,每仓水管预留独立进出水口,实现单仓独立通水控温,适配分级降温施工要求^[2]。

2.2 大坝抗裂专用混凝土配合比及原材料温控优化设计

结合库区年温差、极限温控指标,针对性优选低热原材料,通过正交试验优化配合比,严控混凝土绝热温升、干缩值两大核心指标,适配坝体分区浇筑用料要求,具体优化要点如下:(1)温控抗裂原材料专项优选。胶凝材料选用P·LH42.5低热硅酸盐水泥,限定水泥7天水化热值 $\leq 260\text{kJ/kg}$,禁止普通硅酸盐水泥用于坝基约束区浇筑;掺合料采用粉煤灰+矿粉复配体系,选用I级粉煤灰、S95矿粉,粉煤灰烧失量 $\leq 4\%$,降低水泥用量以削减整体水化热;粗骨料采用两级配玄武岩碎石,粒径5~20mm、20~40mm级配搭配,严控骨料含泥量 $\leq 1\%$,避免杂质提升混凝土收缩值;外加剂选用水工专用缓凝型聚羧酸抗裂减水剂,适配夏季高温拌合、长距离运输工况,延长初凝时间。(2)分区差异化配合比优化。坝基强约束区低热配合比:水胶比0.40,胶凝材料总量 260kg/m^3 ,粉煤灰掺量32%,矿粉掺量10%,塌落度控制120~140mm,7d绝热温升 $\leq 32^\circ\text{C}$;坝身主体常态配合比:水胶比0.43,胶凝材料总量 285kg/m^3 ,粉煤灰掺量28%,兼顾强度与温控性能;坝顶表层抗裂配合比:提高砂浆占比,增设纤维抗裂组分,严控干缩率,适配外露环境昼夜温差工况。(3)拌合工艺配套参数优化。优化砂石含水率动态管控机制,雨天骨料含水率每2h复测调整配合比;严控拌合水温,高温季节拌合用水恒温控制 $6\sim 10^\circ\text{C}$;限定混凝土出机口温度:夏季 $\leq 22^\circ\text{C}$,冬季 $\geq 8^\circ\text{C}$;优化砂率参数,全坝体温控混凝土砂率统一控制34%~36%,提升混凝土极限拉伸值,提升结构自主抗裂能力,适配后续保温、通水整套施工工艺^[3]。

3 大坝混凝土温控抗裂配套核心施工关键技术

3.1 拌合及运输全过程源头预控温施工技术

本环节以严控混凝土出机口温度、运输温升值为核

心,落实原材料预冷、拌合温控、密闭转运标准化施工,具体施工要点如下:(1)分级骨料预冷施工。粗骨料分级堆放分区喷淋预冷,5~20mm小石、20~40mm大石分仓存储,料仓搭设遮阳封闭棚,地下布设喷淋水冷管道,高温季节骨料预冷时长不少于12h,骨料表层温度控制 16°C 以内;砂石料场地设置排水垫层,杜绝骨料积水含水波动,每班次定时检测骨料含水率,实时微调拌合用水量。(2)低温拌合拌合工艺。夏季日均气温高于 28°C 时,采用冰水拌合,拌合用水恒温控制 $5\sim 9^\circ\text{C}$;胶凝材料提前入阴凉仓静置降温,禁止高温水泥直接投料;拌合时长较普通混凝土延长30s,保障低温物料拌合均匀,坝基约束区混凝土出机口温度 $\leq 20^\circ\text{C}$,坝身混凝土出机口温度 $\leq 23^\circ\text{C}$ 。(3)密闭保温转运施工。混凝土罐车通体包裹阻燃保温岩棉,装车前预冷水罐降温;规划最短运输路线,严控运输时长控制在40min以内;罐车卸料口加装密封保温盖板,减少转运过程热风换热,保证混凝土入仓温升值不超过 2°C 。

3.2 仓面分层精细化浇筑温控施工技术

结合坝体约束等级差异化制定浇筑参数,管控浇筑厚度、层间间歇、浇筑时段,减少层间约束应力,标准化仓面施工流程:(1)分区分层厚度管控。坝基0.2倍坝高强约束区,分层浇筑厚度严控1.5m;坝身中部弱约束区,分层浇筑厚度控制2.0m;坝顶自由表层区域,分层厚度1.2m,薄层浇筑加快内部热量散逸,杜绝厚仓一次性浇筑积热。(2)层间间歇时长管控。高温季节层间间歇5~7d,待上层混凝土温降至 30°C 以下再开展下层浇筑;秋冬低温季节间歇缩短至3~4d,避免层间结合面受低温收缩拉裂;雨天停止大面积仓面浇筑,防止雨水改变表层水胶比,诱发表层干缩裂缝。(3)错峰入仓浇筑管控。夏季每日11:00-17:00高温时段停止浇筑,优选夜间20:00至次日7:00低温时段入仓;冬季日间气温高于 5°C 时段集中浇筑,避免夜间低温入仓,降低入仓温差应力^[4]。

3.3 分区梯度通水冷却控温施工技术

依托前文优化冷却水管网,分一期、二期梯度通水,严控降温速率,杜绝极速降温造成结构拉裂,现场施工管控要点如下:(1)水管预埋施工管控。冷却水管采用HDPE高密度聚乙烯管,仓内布设顺直无弯折,管卡扣件间距1m固定牢靠;管道接头采用承插热熔连接,浇筑前逐仓通水试压,试压压力0.4MPa,无渗漏后方可浇筑混凝土;管道距仓面、结构边缘距离严格按设计施工,杜绝振捣作业破损管道。(2)一期早期通水施工。混凝土浇筑完成12h后启动一期通水,强约束区通水水温 $14\sim 16^\circ\text{C}$,坝身通水水温 $16\sim 18^\circ\text{C}$;单仓流量恒定 $2.2\text{m}^3/\text{h}$ 。

h, 每日调转进出水方向一次, 保证坝体降温均匀, 一期降温速率控制 $1.2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 以内。(3)二期稳态通水施工。混凝土温升峰值过后开展二期通水, 放缓通水流量, 将坝体内部温度平稳降至坝体恒温值; 寒潮天气暂停低温通水, 调高通水水温, 防止坝体内部、表层双向温差超标。

3.4 坝面表层保温保湿抗裂防护施工技术

表层裂缝为现场高发温控裂缝, 依托分区保温、常态养护、应急防护三项施工措施, 稳定表层温湿度, 施工管控内容如下: (1)常态化分层保温施工。混凝土收面初凝后即刻覆盖养护, 坝基、坝身立面粘贴 3cm 阻燃保温聚苯板, 拼接缝隙密封封堵; 平面仓面铺设土工保湿毡+保温棉被双层防护; 常态养护时长: 约束区不少于 28d , 坝顶外露区域不少于 35d 。(2)仓面保湿养护管控。采用雾化喷淋养护, 禁止高压直冲仓面; 养护水温与混凝土表层温差控制 $\leq 12^{\circ}\text{C}$, 避免冷水激裂表层混凝土; 风干大风天气增加喷淋频次, 维持表层湿度相对大于 85% 。(3)寒潮应急防护施工。提前对接库区气象预警, 降温幅度 $\geq 8^{\circ}\text{C}$ 寒潮来临前 4h , 加厚坝面保温覆盖层, 孔洞、边角应力部位增设双层棉被封闭; 已拆模立面临时搭设防风围挡, 阻断冷风直吹坝体, 快速平衡结构内外温差。

4 大坝全周期温控智能监测及施工动态调控技术

借助自动化传感装置搭建全覆盖监测体系, 贯穿混凝土拌合入仓、浇筑通水、养护成型全过程, 实时采集温度、应力实测数据, 对照预设温控阈值分级管控, 动态优化施工参数, 提前处置温控异常问题, 具体如下:

(1)坝体温控抗裂一体化监测布设: 在坝基强约束区、冷却水管层间、孔洞应力集中位置、坝顶外露面布置测点, 分层安装光纤温度传感器与振弦式应力传感器, 单个浇筑仓测点不少于 6 组, 上下游坝面对称布置表层测温元件。传感器固定在钢筋中部避开振捣扰动区域, 信号线穿管保护, 探头与混凝土表面、冷却水管保持 30cm 间距, 埋设后编制点位台账, 浇筑前逐一检测设备通断,

确保数据传输稳定可靠。(2)温控数据研判及风险预警管控: 监测系统每 30min 采集一轮温度、应力数据, 自动剔除降雨、设备干扰造成的无效数据, 每日汇总分析温升速率、内外温差、基底应力关键指标并归档备查。设置两级预警机制, 单日降温速率 $1.0\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 、内外温差 $22\sim 25^{\circ}\text{C}$ 为黄色预警; 降温速率超 1.2°C 、内外温差大于 25°C 触发红色预警, 预警信息实时推送现场管理人员。(3)温控超标现场动态调控措施: 预警启动后适当提高通水水温、下调循环流量, 减缓内部降温速度, 坝基强约束区禁止冷水直供, 均衡结构内外温差; 表层温差超标则增设保温覆盖、搭设防风围挡、加大雾化喷淋频次; 若层间温度不满足要求, 延后下层混凝土浇筑间隔, 等温度回落至规范区间再开展后续施工^[5]。

结束语: 本文研究完成大坝混凝土裂缝机理研判、双重维度抗裂优化、配套施工工艺及监测调控技术全套研究, 明确四类裂缝诱发核心因素, 确定圆弧倒角、分区布管、低热复配材料等优化参数, 固化全流程标准化温控施工流程。整套技术摒弃传统全域粗放温控模式, 分区管控温度应力, 施工可落地性强, 能够有效防控坝体深层及贯穿性裂缝。

参考文献

- [1]杨逸江.高温环境下水利工程大坝混凝土温控与裂缝控制技术研究[J].水泥,2026(1):96-98.
- [2]张浩.石灰石掺杂下大坝混凝土施工技术及其裂缝防控技术研究[J].陕西水利,2026(4):189-191.
- [3]杨春安.水库大坝混凝土原材料优化设计与抗裂措施研究[J].水上安全,2025(17):192-194.
- [4]李文伟,江敏敏,向欣,欧阳金惠,周秋景.高寒地区低热水泥混凝土拱坝温控防裂方案[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(5):967-977.
- [5]蒋晓明,颜志强,徐航.通水冷却措施对碾压混凝土坝施工期温度应力及防裂影响研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(6):87-95.