

# 抽水蓄能电站碾压混凝土大坝施工温控防裂措施研究

胡 成

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610000

**摘 要:** 抽水蓄能电站碾压混凝土大坝施工中, 温度裂缝易损害坝体整体性与耐久性, 威胁工程安全稳定运行。本文结合碾压混凝土热工特性, 分析施工期温度场分布规律及裂缝产生机理, 量化材料、施工、环境等关键影响因素, 从材料优化、施工管控、智能监测、特殊工况应对四个维度, 提出针对性温控防裂措施, 通过数值模拟与现场监测验证措施有效性, 为同类工程施工温控防裂提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 碾压混凝土大坝; 施工温控; 防裂措施

引言: 随着抽水蓄能电站规模化发展, 碾压混凝土因施工高效、经济性好等优势广泛应用于大坝建设, 但受水化热、环境温度变化及基础约束等影响, 温控裂缝频发。温度裂缝会削弱坝体防渗性与承载能力, 缩短工程使用寿命, 甚至引发安全隐患。当前温控防裂技术仍存在针对性不足等问题, 因此开展抽水蓄能电站碾压混凝土大坝施工温控防裂研究, 对保障工程质量、提升大坝运行安全性具有重要现实意义。

## 1 抽水蓄能电站碾压混凝土大坝施工温度场特性分析

### 1.1 碾压混凝土材料热工特性

(1) 碾压混凝土热力学参数: 导热系数、比热容、绝热温升是影响温度场的核心参数, 其确定受材料组成、配合比及施工工艺影响。其中, 粉煤灰掺量是关键因素, 掺量增加可降低水泥用量, 减小绝热温升峰值, 同时降低导热系数, 减缓热量传递; 骨料种类与级配也会影响参数, 致密骨料导热系数更高, 合理级配可优化热工性能, 减少温度应力。(2) 材料特性对温度场的影响: 与常态混凝土相比, 碾压混凝土胶凝材料用量少、密实度高, 导热系数略低、绝热温升峰值更低且出现时间延迟。此外, 粉煤灰具有延迟发热特性, 会使碾压混凝土水化热释放时间延长, 导致温度场温升过程平缓, 后期温度回落速度减慢, 易形成长期温和的温度分布。

### 1.2 施工期温度场影响因素分析

(1) 内部因素: 水泥用量直接决定水化热总量, 用量越多, 绝热温升越高; 骨料级配合理可减少胶凝材料用量, 降低水化热; 外加剂可调节水化速率, 缓凝型外加剂能延缓温升峰值出现时间, 减少温度波动。(2) 外部因素: 施工环境温度影响热量散发, 高温环境会减缓散热, 低温易引发表面温度骤降; 浇筑速度过快会导致热量积聚, 碾压工艺不达标会降低密实度, 影响导热性能; 日照会使坝体表面温度升高, 寒潮则会造成表面温

度急剧下降, 加剧温度应力。(3) 工程自身因素: 大坝结构尺寸越大, 热量散发越困难, 内部温度越高; 分仓分块合理可缩短散热路径, 减少温度积聚; 基础约束会限制坝体温度变形, 基础约束区温度分布更不均匀, 易产生温度应力<sup>[1]</sup>。

## 1.3 施工期温度场分布规律研究

(1) 温度场数值模拟: 基于有限元软件建立三维温度场仿真模型, 结合工程实际确定边界散热条件与初始温度, 模拟大坝浇筑、碾压、养护全过程的温度变化, 预判温度场分布趋势与峰值出现时间。(2) 现场温度监测: 设计科学的监测方案, 在基础约束区、非约束区及坝体不同高程布设监测点, 结合工程实例, 分析温度场时空分布规律, 验证数值模拟结果的准确性, 为温度控制提供数据支撑。(3) 温度场特征总结: 施工期分为水化热温升期与自然散热期, 温升期温度快速上升至峰值, 自然散热期温度缓慢回落。基础约束区受基础约束影响, 温度下降缓慢、梯度较大, 与非约束区存在明显温度差异, 是温度裂缝防控的重点区域。

## 2 抽水蓄能电站碾压混凝土大坝开裂机理及影响因素

### 2.1 碾压混凝土大坝开裂类型及特征

(1) 按开裂时间分类: 早期裂缝主要产生于水化热阶段, 因水泥水化释放大量热量, 坝体内部温度快速升高, 表面散热较快形成温度梯度, 引发表面微裂缝, 多为浅层、短缝, 易发展为深层裂缝; 中期裂缝出现在冷却阶段, 坝体内部温度逐渐回落, 体积收缩受基础及周边约束产生拉应力, 超过混凝土抗拉强度后开裂, 裂缝多沿坝体浇筑层面延伸; 后期裂缝发生在运行阶段, 受长期温度变化、水压力作用及材料老化影响, 裂缝易扩展, 甚至形成贯穿裂缝, 影响大坝稳定性。(2) 按裂缝形态分类: 表面裂缝多分布于坝体表面, 深度一般小于1m, 呈不规则网状或条状, 主要影响坝体外观及耐久性,

若不及时处理易深入内部；深层裂缝深度在1-5m之间，多平行于坝轴线分布，会削弱坝体结构整体性，影响承载能力；贯穿裂缝贯穿坝体全断面，破坏坝体防渗性和整体性，易引发渗漏、结构失稳等严重隐患，是大坝安全防控的重点。

## 2.2 温控型裂缝产生机理

(1) 温度应力产生机制：水化热阶段，坝体内部大量聚热导致温度急剧升高，产生膨胀变形，受基础、相邻浇筑块等约束无法自由膨胀，形成压应力；冷却阶段，坝体温度下降，体积收缩，同样受约束无法自由收缩，转化为拉应力；同时，坝体内外、上下存在明显温度梯度，导致不同部位变形差异，引发应力集中，当拉应力超过混凝土抗拉强度时，便会产生裂缝。(2) 裂缝扩展规律：温控型裂缝始于微观裂纹萌生，水化热和降温过程中产生的温度应力使混凝土内部微观孔隙、界面缺陷逐渐发展为微小裂纹；当温度应力持续作用且超过抗拉强度极限时，微小裂纹相互贯通、延伸，形成宏观可见裂缝；温度应力越大、持续时间越长，裂缝扩展速度越快、深度越深，若未及时处理，会从表面裂缝逐步发展为深层、贯穿裂缝<sup>[2]</sup>。(3) 干缩与温度应力耦合作用机理：碾压混凝土浇筑后，表面水分快速蒸发产生干缩应力，干缩应力在综合收缩应力中占比约20%-30%，且多作用于坝体表面。干缩应力与温度应力协同作用时，会叠加拉应力效应，显著降低混凝土抗裂能力，加速裂缝萌生与扩展；尤其在高温干燥环境下，干缩作用加剧，与温度应力耦合后，更易引发表面裂缝并向内部延伸。

## 2.3 温控防裂关键影响因素量化分析

(1) 材料因素：混凝土抗拉强度越高，抗裂能力越强，抗拉强度每提高10%，抗裂阈值可提升8%-12%；弹性模量过大易导致变形约束应力增大，线膨胀系数越高，温度变化引发的变形量越大，两者均与温度应力呈正相关，过量增大易诱发裂缝。(2) 施工因素：浇筑温度每降低1℃，温度应力可降低5%-7%，浇筑温度超过28℃时，开裂风险显著上升；冷却速度过快（日降温超过2℃）会加剧收缩约束，分仓分块尺寸过大则延长散热路径，碾压质量不达标会降低混凝土密实度和抗拉强度，均会增加开裂概率。(3) 环境因素：昼夜温差超过10℃时，坝体表面易产生温度骤变，引发表面裂缝；寒潮来袭时，气温骤降会导致坝体内外温度梯度急剧增大，开裂风险提升30%以上；极端高温会加速水化热积聚，极端低温会加剧收缩，结合工程所在区域气候特征，高温多雨或严寒寒潮地区，需重点防控环境因素引发的裂缝。

## 3 抽水蓄能电站碾压混凝土大坝施工温控防裂措施

### 3.1 材料层面温控防裂措施

(1) 优化混凝土配合比：优先选用低热矿渣水泥或中热硅酸盐水泥，从源头减少水化热生成，降低绝热温升峰值；合理掺加I级或II级粉煤灰等掺合料，掺量控制在30%-50%，替代部分水泥用量，延缓水化热释放速度，同时优化骨料级配，采用连续级配骨料，减少胶凝材料用量，提高混凝土密实度和导热性能，进一步降低温度应力。(2) 外加剂应用：掺加缓凝型外加剂，延长混凝土凝结时间，延缓水化热温升峰值出现时间，避免热量集中积聚；掺加引气剂，引入微小气泡，改善混凝土工作性能，提高其抗冻性和抗裂性；适量掺加膨胀剂，补偿混凝土收缩变形，抵消部分温度收缩应力；针对特殊工况，可添加硅灰提升混凝土抗拉强度，掺加纳米钙基抗冻剂，增强混凝土抗冻能力，适配不同气候条件下的施工需求。(3) 原材料预冷：夏季施工时，对骨料进行预冷处理，采用风冷、水冷或真空冷却等方式，将骨料温度控制在15℃以下；采用冷水进行拌和，拌和水温度控制在5-10℃，同时优化拌和工艺，缩短拌和时间，减少热量带入；此外，对水泥、粉煤灰等胶凝材料进行遮阳存放，避免高温暴晒，确保混凝土出机口温度不超过28℃，入仓温度不超过30℃，针对性解决夏季高温施工的降温难题<sup>[3]</sup>。

### 3.2 施工层面温控防裂措施

(1) 分仓分块施工：结合大坝结构尺寸和施工能力，合理划分仓块尺寸，一般单仓面积控制在200-300m<sup>2</sup>，仓块高度不超过3m，确定合理的施工间歇时间，确保相邻仓块浇筑间隔满足散热要求；采用通仓或分仓薄层间歇铺筑方式，铺筑厚度控制在30-50cm，减少单次浇筑热量积聚；在坝体关键部位设置诱导缝，引导裂缝集中出现，减少约束应力，避免裂缝无序扩展。(2) 浇筑与碾压工艺优化：严格控制浇筑速度，每小时浇筑强度不超过200m<sup>3</sup>，避免混凝土堆积导致热量无法及时散发；控制平仓厚度，确保平仓均匀，避免骨料分离，影响混凝土整体性能；优化碾压遍数，采用“初压、复压、终压”三步碾压法，碾压遍数控制在6-8遍，确保混凝土密实度达到设计要求，同时加强层面结合处理，清除层面浮浆和杂物，铺设水泥浆或砂浆，减少层面裂缝产生<sup>[4]</sup>。(3) 人工冷却措施：在混凝土浇筑过程中，预埋冷却水管，水管间距控制在1.5-2.0m，呈梅花形布置，浇筑完成后及时进行分期通水冷却，遵循“小温差、早冷却、缓慢冷却”的原则，初期采用温水冷却，后期逐步降低水温，控制日降温速率不超过2℃，避免降温过快引发收缩裂缝，同时控制坝体内外温度梯度不超过25℃，减少应力集中。(4)

表面保温养护：混凝土浇筑完成后，及时覆盖土工布、保温被等保温材料，覆盖厚度根据环境温度调整，确保混凝土表面温度缓慢下降；冬季施工时，采取加热拌和水、骨料预热等措施，仓面搭设保温棚，采用蒸汽或电加热方式维持仓面温度，防止混凝土受冻开裂；夏季施工时，在仓面搭设遮阳棚，采取喷雾降温措施，避免阳光直射导致表面温度骤升骤降。

### 3.3 监测与智能调控层面温控防裂措施

(1) 温度与应力监测：在坝体基础约束区、非约束区、不同高程及关键部位布设温度监测点和应力监测传感器，实时监测温度场、温度应力及坝体位移变化；应用北斗位移监测系统、智能温度采集终端等先进手段，实现监测数据的实时传输、存储和分析，全面掌握坝体温控状态，及时发现温度异常和应力超标情况。(2) 实时调控策略：基于监测数据，建立温控调控模型，动态调整冷却强度、通水流量和水温，优化保温覆盖措施，针对温度梯度过大、应力超标的部位，及时采取加强保温或减缓冷却速度等措施，实现温控过程的智能化、精细化调控，确保温度场分布均匀，温度应力控制在混凝土抗拉强度范围内。(3) 裂缝预警与应急处理：建立裂缝预警机制，根据监测数据设定预警阈值，当温度应力接近抗拉强度或出现微小裂缝时，及时发出预警信号；对已出现的表面裂缝，采用环氧砂浆、聚合物砂浆等材料进行封闭修补；对深层裂缝，采用压力灌浆方式填充裂缝，防止裂缝进一步扩展，确保坝体结构安全<sup>[5]</sup>。

### 3.4 特殊工况温控防裂措施

(1) 寒潮工况：提前关注天气预报，在寒潮来临前24小时，对坝体表面进行保温加固，增加保温层厚度，对预埋冷却水管采取暂停通水或减缓通水速度的措施，避免坝体表面温度骤降；寒潮期间，加强仓面保温，禁止在严寒时段进行浇筑作业，防止混凝土受冻产生裂缝。(2) 高温季节施工：优化施工时段，避开中午高温时段，选择

清晨、傍晚等气温较低的时段进行浇筑作业；加强仓面遮阳、通风，搭设遮阳棚，采用喷雾降温、洒水保湿等措施，降低仓面环境温度；加大原材料预冷力度，进一步降低混凝土入仓温度，同时延长养护时间，确保混凝土强度稳步增长，提升抗裂能力。(3) 基础约束区施工：基础约束区是裂缝高发区域，施工时严格控制基础温差，不超过20℃，坝体最高温度不超过设计限值；加强基础部位的保温与冷却，在基础表面铺设保温层，预埋冷却水管并提前通水，减少基础约束产生的拉应力；采用薄层浇筑、缩短间歇时间等方式，加快基础部位混凝土散热，降低温度应力，防止基础约束区出现裂缝。

### 结束语

本文系统研究了抽水蓄能电站碾压混凝土大坝施工温控防裂相关问题，明确了温度场特性、裂缝开裂机理及关键影响因素，构建了多维度、全流程温控防裂体系。实践表明，所提措施可有效控制温度应力，降低裂缝产生概率，保障坝体施工质量。后续可结合智能监测技术升级，优化温控措施适配性，针对复杂地质与气候条件深化研究，为抽水蓄能电站大坝工程高质量建设提供更完善的技术支撑。

### 参考文献

- [1]胡贵良.高海拔寒冷地区高拱坝混凝土冬季浇筑防裂关键技术[J].水利学报,2024,55(4):489-498.
- [2]张伟.抽水蓄能电站混凝土重力坝智能温控技术应用研究[J].水电能源科学,2023,41(6):167-171.
- [3]刘毅.低热混凝土在大型水电工程中的应用与质量控制[J].施工技术,2023,52(11):98-102.
- [4]赵恒.混凝土坝温度应力监测与智能调控系统研发[J].人民黄河,2024,46(2):145-150.
- [5]张建峰.高拱坝薄层浇筑与全周期养护防裂技术实践[J].水利水电技术,2023,54(8):189-196.