

水利水电工程高坝施工中的温控防裂技术研究

谢琼

新余市祥铖建筑工程设备有限公司 江西新余 338000

摘要: 水利水电工程高坝施工中, 混凝土因水化热释放、外界环境温度变化及结构约束等因素易产生温度应力, 导致裂缝形成, 影响工程安全性和耐久性。本文围绕高坝施工温控防裂技术展开研究, 分析了裂缝产生的主要原因, 从材料优化、施工工艺改进、温控措施制定及监测预警体系构建等方面, 探讨了温控防裂技术的核心原理与应用路径, 旨在为高坝工程施工提供系统性的温控解决方案, 保障大坝结构的长期稳定运行。

关键词: 水利水电工程; 高坝施工; 温控防裂; 温度应力

引言

随着水利水电工程向高坝、大库方向发展, 坝体结构日趋复杂, 施工难度显著提升。混凝土作为高坝建设的核心材料, 其在浇筑、养护过程中因温度变化产生的裂缝问题一直是工程建设中的关键挑战。温度裂缝不仅会削弱坝体的承载能力和抗渗性能, 还可能引发结构耐久性下降、运行风险增加等连锁反应。因此, 深入研究高坝施工中的温控防裂技术, 通过科学手段控制混凝土温度场与应力场的变化, 已成为确保工程质量、延长坝体使用寿命的重要课题。

一、高坝混凝土温度场与温度应力的影响因素

(一) 原材料特性与混凝土配合比的影响

原材料特性与混凝土配合比是决定高坝混凝土温度场与温度应力的内因, 其影响贯穿于水化放热的全过程。水泥作为主要胶凝材料, 其矿物组成是水化热释放的根本来源。例如, 水泥中硅酸三钙(C3S)和铝酸三钙(C3A)含量越高, 早期水化反应速率越快, 释放的集中热量越大, 导致混凝土内部温升峰值更高、出现时间更早。骨料的种类与级配则通过其比热容和导热系数影响混凝土的储热和散热能力, 使用导热系数较低的骨料(如某些玄武岩)会减缓内部热量向表面的传递, 加剧内外温差。混凝土配合比, 特别是单位体积水泥用量和水胶比, 直接控制着水化热的总量。降低水泥用量或掺入粉煤灰、矿渣粉等活性矿物掺合料, 能够有效稀释水泥浓度, 延缓水化进程, 削减温升峰值。水胶比不仅影响水化热, 还决定了混凝土的早期强度发展速率, 较低的水胶比有助于提高混凝土早期抗拉强度, 增强其抵抗温度应力的能力。

(二) 施工环境与气候条件的影响

施工环境与气候条件是影响高坝混凝土温度场与温度应力的主要外部因素, 它们直接决定了混凝土与外界环境的热交换过程。环境温度是影响混凝土表面散热的最直接因素, 浇筑时环境温度越高, 混凝土的初始温度越高, 且表面散热越慢, 导致内部热量积聚。昼夜温差和季节性温度变化则引起混凝土表面温度的剧烈波动, 当表面因降温而收缩时, 内部仍处于高温膨胀状态, 由此产生的温度梯度是导致表面开裂的重要原因。太阳辐射对坝体表面的直接加热作用不容忽视, 它会使向阳面的混凝土温度显著高于背阴面, 形成不均匀的温度场, 引发复杂的温度应力分布。风速和空气湿度则影响混凝土表面的水分蒸发和蒸发散热速率, 高风速和低湿度会加速表面水分散失和热量带走, 增大表层混凝土的干缩和温缩, 增加开裂风险^[1]。

(三) 结构设计与施工工艺的影响

结构与施工工艺是影响高坝混凝土温度场与温度应力分布特征的关键人为因素, 它们决定了混凝土内部热量传导的路径和约束条件。在结构设计方面, 坝体的几何尺寸与形状是基础性影响因素, 坝体越厚, 水化热越难散发, 内部积热效应越显著, 内外温差越大。结构孔洞、廊道等的存在会造成温度场的局部畸变, 在这些边角区域容易产生应力集中。坝段的分缝分块设计, 如横缝、纵缝的设置, 旨在通过释放约束来减小温度应力, 其划分方式直接影响了各浇筑块的尺寸和约束条件。在施工工艺方面, 浇筑层厚和间歇期是核心控制参数。薄层浇筑有利于内部水化热的散发, 但会增加施工缝数量; 过长的间歇期会使下层混凝土对上层新浇混凝土形成强约束, 增大上层混凝土的温度应力。通水冷却工艺

的布置（如冷却水管间距、通水水温、流量和启停时间）是主动干预温度场的直接手段，其参数的合理性直接决定了降温效果和降温速率，不当的冷却反而可能引起过大的温度梯度。浇筑温度的控制，如预冷骨料、加冰拌合等措施，直接设定了混凝土温度场的初始条件^[2]。

二、高坝施工全过程的温控防裂关键技术

（一）混凝土原材料优选与配合比优化

混凝土原材料优选与配合比优化是温控防裂的源头性技术，其核心目标是在满足设计强度、耐久性和工作性要求的前提下，最大限度地降低混凝土的绝热温升并优化其热力学性能。原材料优选首先聚焦于水泥，选用具有低水化热特性的中热或低热水泥，或通过调整水泥熟料矿物组成，降低C3A和C3S的含量，是削减早期放热总量的根本途径。其次，大量掺加粉煤灰、矿渣粉等活性矿物掺合料，利用其微集料填充效应和二次水化反应，不仅能有效替代部分水泥，直接减少发热源，其火山灰效应的滞后性还能显著延缓水化放热峰值的到来，为混凝土内部热量散发争取宝贵时间。在骨料选择上，优先采用线膨胀系数小、热稳定性好且级配优良的骨料，以降低混凝土的温度变形系数。配合比优化则是在此基础上，通过降低水胶比来提高混凝土的早期强度和极限拉伸值，使其在承受温度应力时具备更高的抗裂能力。同时，通过高效减水剂的精确使用，在保证流动性的前提下进一步减少拌合用水，从而降低水泥水化的绝对需水量。该技术的深层价值在于，它将温控措施从被动的施工过程干预前移至主动的材料设计阶段，通过构建一个低热、高抗裂的混凝土材料体系，为后续所有温控措施的实施奠定了内在的、优越的基础，是实现高坝防裂的第一道，也是最关键的防线^[3]。

（二）浇筑过程中的温度控制措施

浇筑过程中的温度控制措施是防止混凝土初始温度过高、控制早期温升速率的关键环节，其技术核心在于对混凝土入仓温度和浇筑后早期温升的直接干预。控制入仓温度主要通过预冷技术实现，包括对粗骨料进行风冷或水冷，对拌合水采用制冷水或掺加冰屑，以及在高温季节对水泥和粉煤灰储罐进行遮阳或喷淋降温。这些措施的综合运用，能够将混凝土的出机口温度和经过运输、浇筑后的入仓温度严格控制在设计允许的范围内，从而设定一个有利的初始温度场。在浇筑过程中，采用薄层、短间歇、均匀上升的浇筑方法，是控制水化热积聚的有效工艺手段。较薄的浇筑层增加了混凝土与空气和下层老混凝土的接触面积，有利于内部热量的散发，

从而降低温升峰值。合理的间歇期则保证了下层混凝土的水化热得到一定程度的释放，并使早期强度得到发展，避免了对上层新浇混凝土产生过强的约束。此外，通过优化浇筑仓面布置和浇筑顺序，避免在高温时段或日照强烈的区域进行浇筑，也是减少外界热量输入的重要管理措施。这些过程控制技术的价值在于，它们直接作用于混凝土温度形成和发展的最活跃阶段，通过一系列精细化的操作，将混凝土的初始温度和早期温升速率控制在预设的轨道内，有效降低了因早期剧烈温变而引发开裂的风险。

（三）浇筑后期的冷却与养护技术

浇筑后期的冷却与养护技术是削减混凝土内部温度峰值、控制降温速率以及防止表面温度骤降的最后一道技术保障。其核心任务是在混凝土水化热释放的中后期，主动引导其内部温度平稳、安全地降至稳定温度场。内部冷却技术主要依赖于预埋在混凝土中的冷却水管系统。通过控制冷却水的温度、流量、通水时间及通水模式（如连续通水或间歇通水），可以精确调控混凝土内部的降温速率。科学的冷却策略要求降温速率均匀且可控，避免因冷却过快导致混凝土内外产生过大的温度梯度，从而引发新的温度应力。在内部降温的同时，表面养护技术对于防止表面裂缝至关重要。prolonged的表面洒水、喷雾或覆盖保湿材料（如塑料薄膜、土工布）能够维持混凝土表面的湿润状态，一方面保证了水泥水化的持续进行，有利于强度增长，另一方面，水分蒸发会带走大量热量，起到了辅助降温的作用。更重要的是，在气温骤降或昼夜温差大的时段，采取覆盖保温材料等措施，可以有效减缓混凝土表面的降温速度，防止其因温度骤降而收缩，与内部混凝土形成过大的拉应力。这些后期技术的价值在于，它们对混凝土的温度场进行精细的“收尾”管理，通过内部主动降温和外部被动保温的协同作用，确保混凝土在达到稳定温度场的过程中，其内部产生的温度应力始终低于材料的抗拉强度，从而彻底杜绝后期温度裂缝的产生，保障高坝的长期运行安全^[4]。

三、高坝温控防裂的实时监控与动态调控

（一）施工期温度与应力的实时监测技术

施工期温度与应力监测需聚焦混凝土关键温控指标，理论核心在于明确监测参数、设备选型与布点逻辑：监测参数需覆盖混凝土内部温度（浇筑块核心、中间、表层）、表面温度、环境温度（气温、湿度、风速）及应力应变（水平、竖向应力），其中温度梯度需控制在25℃以

内(符合《混凝土重力坝设计规范》SL 319-2018要求),应力值需低于混凝土同龄期抗拉强度的70%;设备选型需优先选用适应高湿、高应力环境的传感器(如光纤光栅温度传感器、振弦式应力计),确保测量精度(温度精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、应力精度 $\pm 0.1\text{MPa}$)与数据稳定性;布点需按浇筑块分层布置(每3-5m设1层监测点),重点覆盖基础约束区、浇筑块边角等易裂部位。某大型水电站重力坝施工项目(坝高150m,浇筑总量280万 m^3),该项目布设500套光纤光栅传感器与300套振弦式应力计,监测数据每10分钟自动采集1次,传输至监控中心。施工期间,通过监测发现基础约束区混凝土核心温度达 68°C ,与表层温差 28°C (超阈值),及时触发后续调控,避免裂缝产生,监测数据有效率达98%,为温控决策提供精准依据。

(二) 基于监测信息的温控措施动态调整

基于监测信息的调整需建立“数据反馈-阈值判定-措施优化”的闭环逻辑,理论上需根据监测到的温度、应力数据,对应调整温控手段:当温度梯度超限时,优先调整通水冷却参数(如增大冷却水流速、延长通水时间);当应力接近限值时,需优化浇筑间歇期(避免约束应力叠加)或加厚表面保温层(减少散热速率);调整需遵循“分级响应”原则,轻微超差由现场技术人员处置,严重超差(如应力超抗拉强度80%)需上报项目总工办制定专项方案。延续上述水电站项目,该项目设定三级调整阈值:温度梯度 $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ 为一级预警(调整冷却水流速从 1.5m/s 增至 2.0m/s), $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ 为二级预警(叠加延长通水时间至120小时),超 30°C 为三级预警(暂停浇筑并加厚保温层至5cm)。2022年夏季施工期间,监测到某浇筑块温度梯度达 27°C (二级预警),现场立即将冷却水流速提升至 2.0m/s ,同时延长通水至120小时,48小时后温度梯度降至 22°C ,应力值从 3.2MPa (接近限值 3.5MPa)降至 2.8MPa ,成功规避裂缝风险,调整措施有效率达95%。

(三) 温控防裂信息化管理体系的构建

温控防裂信息化体系需整合数据采集、分析、预警、归档功能,理论层面需包含四层架构:数据采集层(传感器、数据采集终端)负责实时获取监测数据;数据分析层(基于BIM与有限元算法)实现温度场、应力场模拟与趋势预测;预警决策层(设定自动预警阈值)推送超差信息至相关责任人;档案管理(数据库)存储历

史数据,用于后续工程参考。体系需具备“可视化展示”与“移动端联动”功能,方便管理人员实时查看数据、远程下达调整指令,减少人工干预误差。仍以上述水电站项目为例,该项目构建的信息化体系集成BIM模型与温控数据库,可动态展示各浇筑块温度分布云图,预警信息通过APP推送,响应时间 ≤ 15 分钟。体系运行期间,共自动推送预警信息86条,平均处置时间从原人工管理的2小时缩短至40分钟;历史数据归档完整度达100%,后期同类浇筑块温控参数优化参考该数据,使混凝土裂缝发生率从项目初期的3‰降至1‰,显著提升温控防裂管理效率^[5]。

结语

高坝施工中的温控防裂技术是一项复杂的系统工程,其成功实施依赖于对混凝土温度场和应力场的全面理解和精准控制。通过从材料优选、施工过程到后期养护的全过程管理,结合实时监测与信息化手段,能够显著降低裂缝风险,提升工程质量和耐久性。然而,实际工程中仍面临诸多挑战,例如极端气候条件下的温控措施优化、大规模施工中的协调管理以及新技术的应用推广等。未来的研究应更加注重多学科交叉,结合智能化、数字化技术,进一步完善温控防裂理论体系和实践方法。同时,需加强对历史数据的深度挖掘,为类似工程提供更具针对性的参考依据,从而推动高坝建设技术的持续进步。

参考文献

- [1]江敏敏,蔡新,郭兴文,等.泵站施工期温控防裂敏感性分析研究[J].水利水电技术,2020.
- [2]邢坦,胡文才,王振红.碾压混凝土坝陡坡坝段施工期温控防裂研究[J].人民黄河,2020,42(2):6.DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2020.02.028.
- [3]晏国顺,顾志强,陕亮.大古水电站RCC重力坝施工期温控防裂研究[J].中国农村水利水电,2022(1):8.DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2022.01.033.
- [4]韩小妹,邵剑南,杨春宝.高寒区混凝土坝低温防裂温控措施的探讨[J].水利规划与设计,2021(1):5.DOI:10.3969/j.issn.1672-2469.2021.01.026.
- [5]王继敏,郑江.锦屏一级水电站工程建设重大关键技术研究与实践[J].水利学报,2021.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20200819.