

大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的优化路径与管理实践

陈泳如

身份证号: 440921199411240046

DOI:10.61369/WCEST.2025020009

摘 要 : 介绍水利水电工程大体积混凝土温控防裂技术, 包括水泥水化热等因素对温度场影响, 现行施工技术标准, 温控技术瓶颈。阐述基于有限元模型、分布式光纤测温等新技术, 以及配合比优化、温度梯度分级控制等方法, 强调全周期管理及未来发展方向。

关 键 词 : 大体积混凝土; 温控防裂; 水利水电工程

Optimization Path and Management Practice of Temperature Control and Crack Prevention Technology for Large Volume Concrete in Water Conservancy and Hydropower Projects

Chen Yongru

ID: 440921199411240046

Abstract : This paper introduces the temperature control and crack prevention technology for large-volume concrete in water conservancy and hydropower projects, including the impact of factors such as cement hydration heat on the temperature field, current construction standards, and the technical challenges in temperature control. It discusses new technologies, such as finite element modeling and distributed optical fiber temperature measurement, along with methods like mix design optimization and temperature gradient control, emphasizing full-cycle management and future development directions.

Keywords : large volume concrete; temperature control and crack prevention; water conservancy and hydropower engineering

引言

水利水电工程中, 大体积混凝土温控防裂是关键问题。随着工程建设的发展, 相关技术不断演进。2021年发布的《水利工程建设标准强制性条文》对温控有明确要求, 为大体积混凝土施工提供了规范依据。水泥水化热、骨料热膨胀系数、混凝土徐变等因素影响温度场和应力, 同时施工面临多种特殊约束条件。温控技术包括冷却水管布置、分缝分块、养护工艺等, 但传统技术如预冷骨料和通水冷却存在瓶颈。为解决这些问题, 开发了热-力耦合仿真模型、分布式光纤测温技术等, 还探索了配合比优化方法、温度梯度分级控制标准等, 同时全周期工程管理实践体系下的各项措施也在不断完善和创新。

一、大体积混凝土温控防裂技术基础理论

(一) 材料热学特性与温度应力关系

水泥水化热是大体积混凝土内部温度升高的主要热源。水泥在水化过程中会释放大量热量, 导致混凝土内部温度迅速上升。由于混凝土的导热性能较差, 热量难以快速散发, 从而在混凝土内部形成温度梯度^[1]。骨料热膨胀系数对温度场也有重要影响。不同骨料的热膨胀系数不同, 当温度变化时, 骨料与水泥浆体之间会因热膨胀系数的差异产生变形不协调, 进而引发温度应力。混凝土的徐变特性同样不可忽视。徐变是指混凝土在长期荷载作

用下的变形随时间而增加的现象。在温度应力作用下, 混凝土的徐变会使应力得到一定程度的松弛, 从而影响温度场的分布和温度应力的分布。

(二) 水利水电工程特殊约束条件

在水利水电工程中, 大体积混凝土面临多种特殊约束条件。坝体几何特征是重要因素之一, 不同的坝体形状和尺寸会影响混凝土内部的温度分布和应力状态。例如, 较厚的坝体散热相对较慢, 容易产生较大的温度梯度^[2]。施工季节温差也对温度裂缝形成有显著影响, 夏季施工时, 外界温度较高, 混凝土入仓温度也高, 与内部散热产生的温差可能导致裂缝; 冬季施工则可能因混

凝土内外温差过大以及低温环境下混凝土性能变化而出现裂缝。基础约束条件同样不可忽视，坝体底部与基础相连，基础对坝体混凝土的变形产生约束，当混凝土因温度变化产生收缩或膨胀时，这种约束会引发应力集中，从而增加裂缝产生的可能性。

二、传统温控技术体系解析

（一）现行施工技术标准体系

在水利水电工程大体积混凝土施工中，现行施工技术标准体系对温控有明确规定。冷却水管布置方面，需考虑混凝土结构特点、热交换效率等因素，合理确定管径、间距和埋深，以有效带走混凝土内部热量^[9]。分缝分块原则依据结构受力、混凝土浇筑能力和温控要求制定，通过合理分缝分块，减少约束，降低温度应力。养护工艺上，强调早期保湿保温，如采用覆盖塑料薄膜、草帘等措施，减少混凝土表面水分蒸发和温度散失，确保混凝土强度增长过程中温度和湿度条件适宜，防止裂缝产生。

（二）技术应用瓶颈与工程事故分析

预冷骨料是传统温控技术中的重要环节，然而其可能因多种原因失效。例如，预冷设备故障或选型不当，可能无法达到预期的冷却效果^[4]。此外，操作流程不规范，如冷却时间、温度控制不准确，也会影响预冷效果。通水冷却同样存在问题，失控情况时有发生。一方面，冷却水管的布置不合理，可能导致水流不均匀，局部温度过高或过低。另一方面，通水流量和水温的控制难度较大，如果不能精确调节，将无法有效控制混凝土的温度。这些技术应用瓶颈可能引发工程事故，如混凝土开裂，严重影响水利水电工程的质量和安

三、多维度温控技术优化路径

（一）温度场精准调控技术

1. 数字化温度预测模型构建

开发基于有限元的热 - 力耦合仿真模型实现施工过程温度场动态模拟。利用有限元方法对大体积混凝土结构进行离散化处理，将其划分为多个单元，通过建立热传导方程、应力平衡方程以及本构关系，考虑混凝土的热学和力学特性随时间和温度的变化^[6]。同时，结合实际施工过程中的边界条件，如浇筑温度、环境温度、模板散热等因素，对模型进行准确的参数设定。通过求解热 - 力耦合方程组，得到不同施工阶段混凝土内部的温度场分布以及应力应变状态，从而为温度场的精准调控提供科学依据，有效预测可能出现的温度裂缝位置和发展趋势。

2. 智能温控设备创新应用

分布式光纤测温技术可实时监测大体积混凝土内部温度场^[6]。通过在混凝土内部合理布置光纤传感器，获取温度数据，为温度调控提供精准依据。自适应通水冷却系统则根据温度监测结果自动调整通水流量和水温，实现高效冷却。将两者集成控制，可进一步优化温控效果。一方面，分布式光纤测温系统的精确数据能指导自适应通水冷却系统的运行参数调整，确保冷却过

程与混凝土实际温度变化相匹配。另一方面，自适应通水冷却系统的及时反馈也有助于验证和优化分布式光纤测温系统的布置和监测策略，从而实现多维度的温度场精准调控，提高大体积混凝土温控防裂技术水平。

（二）施工工艺综合创新

1. 新型补偿收缩混凝土配制技术

开发具有延迟膨胀特性的 MgO 微膨胀混凝土配合比优化方法是新型补偿收缩混凝土配制技术的关键。通过精确控制 MgO 的含量及活性，可调节混凝土的膨胀性能，使其在水化过程中产生适度膨胀以补偿收缩应力。同时，考虑水泥品种、细度及水化热等因素对混凝土性能的影响，合理选择水泥，优化其与 MgO 及其他外加剂的组合。此外，骨料的级配、粒径及含泥量等也至关重要，良好的骨料级配可提高混凝土的密实性和抗裂性。综合考虑各因素间的相互作用，运用先进的试验方法和分析手段，不断优化配合比，以提高混凝土的抗裂性能^[7]。

2. 全过程温度梯度控制工艺

在大体积混凝土施工中，从浇筑时序控制到后期养护建立温度梯度分级控制标准至关重要。浇筑过程中，需根据混凝土的配合比、浇筑速度和环境温度等因素，合理确定浇筑层厚和浇筑间隔时间，以控制混凝土内部温度上升速率^[8]。同时，在养护阶段，要依据不同阶段的温度要求，采取相应的养护措施。例如，在早期，可采用覆盖保温材料等方式减少热量散失，降低内外温差；在后期，根据温度变化情况适时调整养护措施，确保混凝土温度梯度在合理范围内，从而有效防止混凝土因温度应力而产生裂缝。

四、全周期工程管理实践体系

（一）技术决策支持系统

1. 多源信息融合决策平台

构建包含气象数据、实时监测、材料参数的智能决策模型，需融合多源信息。气象数据可提供温度、湿度等环境因素，对大体积混凝土温控至关重要^[9]。实时监测数据包括混凝土内部温度、应力等，能及时反馈实际情况。材料参数如水泥品种、配合比等影响混凝土性能。通过整合这些数据，利用数据分析和算法，建立智能决策模型。该模型可对混凝土温控防裂进行预测和决策支持，例如根据气象数据和材料参数预测混凝土温升值，结合实时监测数据调整温控措施，从而实现科学有效的温控防裂管理，提高水利水电工程质量。

2. 风险预警与应急响应机制

在全周期工程管理实践体系中，风险预警与应急响应机制至关重要。对于大体积混凝土温控防裂技术应用的水利水电工程，需建立基于温度应力阈值的三级预警响应制度。通过实时监测混凝土内部温度及应力变化，当达到不同阈值时触发相应等级的预警。在技术决策支持系统辅助下，分析预警数据，快速制定应对策略。这不仅能及时发现潜在的温控防裂风险，还能确保在风险发生初期采取有效的控制措施，避免裂缝的产生和扩展，保障工

程质量和安全^[10]。

（二）施工组织创新模式

1. 工序链协同管理机制

水利水电工程中，大体积混凝土温控防裂需从全链条考虑。混凝土生产环节，要精准把控原材料质量与配合比，确保混凝土性能稳定。运输过程中，需根据距离和时间，采取合适的保温或降温措施，保证混凝土入模温度符合要求。浇筑时，要合理安排浇筑顺序和速度，避免出现冷缝等问题。养护阶段，依据环境条件和混凝土特性，制定科学的养护方案，如覆盖保温材料、定时洒水等。通过对生产－运输－浇筑－养护全链条的进度协同控制，各工序紧密衔接，形成有机整体，有效提高混凝土质量，减少温控防裂风险，确保水利水电工程的质量和安全性。

2. 资源动态调度策略

在全周期工程管理实践体系下的施工组织创新模式中，资源动态调度策略至关重要。对于大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程而言，开发基于温度场演变的冷却水资源优化配置算法是关键。需深入研究温度场的变化规律，结合工程实际情况，建立精准的数学模型。通过对温度数据的实时监测与分析，动态调整冷却水资源的分配。同时，考虑不同施工阶段的需求差异，合理安排资源调度计划。要综合考虑工程进度、质量要求以及成本控制等多方面因素，确保冷却水资源的优化配置能够有效实现温控防裂目标，提高水利水电工程的质量和安全性。

（三）质量保障制度构建

1. 全过程文档追溯体系

建立涵盖原材料检测、施工参数、监测数据的三级档案管理制度。对于原材料检测档案，详细记录各类原材料的来源、质量检测报告、检验时间等信息，确保原材料质量可追溯。施工参数档案应包含混凝土配合比、浇筑温度、养护条件等关键参数，为施工过程提供准确依据。监测数据档案则要记录温控监测点的温

度变化、应力应变数据等，以便及时发现异常情况。通过这三级档案管理制度，实现对大体积混凝土温控防裂技术相关文档的全面追溯，为水利水电工程质量保障提供有力支持。

2. 参建方协同管控标准

在全周期工程管理实践体系的质量保障制度构建中，参建方协同管控标准至关重要。对于大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的应用，需明确设计、施工、监测三方责任矩阵。设计方应提供合理的温控设计方案，考虑混凝土的配合比、浇筑方式等对温度的影响。施工方需严格按照设计要求进行施工操作，确保温控措施的有效实施，如合理安排浇筑时间和速度等。监测方要实时监测混凝土内部温度变化，及时反馈数据。同时，建立信息共享规范，三方应及时、准确地传递相关信息，以便对温控防裂技术进行动态调整和优化，确保工程质量。

五、总结

大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中至关重要。通过对多个特高拱坝工程的研究，我们系统总结了温控技术创新成果的应用经验。这些经验为后续工程提供了宝贵的参考，有助于提高工程质量和安全性。

同时，我们也指出了未来的发展方向。基于数字孪生技术的全要素智能温控系统具有巨大的潜力。它可以实现对混凝土温度的实时监测和精准控制，提高温控效果。此外，工程质量保险制度的引入也将为工程提供更全面的保障。它可以激励各方积极参与工程质量管理，降低工程风险。

未来，我们需要进一步加强对温控防裂技术的研究和应用。通过不断创新和完善，提高技术水平，为水利水电工程的可持续发展提供有力支持。

参考文献

[1] 冒云瑞. 基于功能集料的大体积混凝土控温防裂技术 [D]. 东南大学, 2022.
[2] 张玲丽. 重力式锚碇结构大体积混凝土防裂控制技术研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
[3] 王明涛. 大体积混凝土智能温控系统研究与实现 [D]. 贵州大学, 2023.
[4] 何江伟. 铁路桥梁大体积混凝土施工与温控技术研究 [D]. 中国铁道科学研究院, 2023.
[5] 谢晓冬. 沉管隧道大体积混凝土的水化热分析与温控技术研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
[6] 李松辉, 张国新, 刘毅, 等. 大体积混凝土防裂智能监控技术及工程应用 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(01): 9–15.
[7] 张财会. 建筑工程大体积混凝土温控防裂施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(12): 45–46.
[8] 范轴. 一次性浇筑大体积混凝土底板温控防裂技术研究 [J]. 水利技术监督, 2022(8): 206–211.
[9] 黎锦钊. 清远二线船闸工程大体积混凝土施工工期温控防裂研究 [J]. 水利科技与经济, 2022, 28(3): 126–129, 133.
[10] 姜峰. 水利工程大体积混凝土温控防裂技术 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(3): 191–193.