

高寒地区混凝土坝施工温控防裂技术探讨

丁卫东

新疆建设兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 高寒地区混凝土坝施工面临极端低温、昼夜温差大及冻融循环频繁等挑战,需通过系统性温控防裂技术保障工程质量。本文从原材料优化、施工过程调控、养护体系构建及全过程监测四方面展开探讨,结合低水化热水泥、智能保温棚、循环水管路等具体措施,有效控制温度应力与收缩变形,降低裂缝风险,提升坝体耐久性,为高寒地区类似工程提供技术参考。

关键词: 高寒地区; 混凝土坝; 温控防裂技术

引言: 高寒地区混凝土坝施工环境严苛,极端低温延缓水泥水化反应,降低早期强度发展速率;昼夜温差显著易形成温度梯度,导致表面收缩快、芯部收缩慢的应力失衡;冻融循环反复作用加剧结构损伤。温控防裂需统筹材料优化、工艺调控与养护协同,通过骨料预处理、分层浇筑、动态养护等手段,平衡温度应力与收缩变形,确保混凝土均匀硬化,避免裂缝产生,保障工程安全与长期稳定性。

1 高寒地区混凝土坝施工温控防裂技术概述

高寒地区混凝土坝施工环境恶劣,表现为极端低温、昼夜温差大及冻融循环频繁。为此,温控防裂技术必须进行系统性设计,统筹考虑材料、工艺与养护措施,以确保工程质量和结构耐久性。(1) 原材料优化控制: 采用低水化热水泥并复配抗冻型外加剂,可降低混凝土内部温升速率及峰值温度,减少温度裂缝风险。骨料需严格筛选,避免含冰或易冻物质,同时控制砂石含水率以减少冻胀应力。配合比设计需兼顾强度发展与抗裂性能,通过添加纤维材料增强混凝土韧性,提升抗裂能力。(2) 施工过程温度精准调控: 浇筑温度需控制在适宜范围,避免低温导致混凝土冻结或高温加速水化热释放。分层浇筑厚度需根据环境温度动态调整,采用薄层浇筑方式可加速热量散失,减少温度梯度。间歇期需覆盖保温材料,如聚苯乙烯泡沫板或棉被,维持混凝土表面温度,防止表面冻裂。(3) 养护体系立体化构建: 初期养护需采用蒸汽养护或电热毯加热,维持混凝土内部温度稳定,避免温差过大引发裂缝。中期养护需结合保温棚与温控监测系统,实时调整养护温度,确保混凝土均匀硬化。后期养护需注重保湿防冻,通过喷涂养护剂或覆盖湿麻袋,减少水分蒸发与冻融损伤^[1]。该技术体系通过材料、施工、养护三环节协同作用,有效控制混凝土温度应力与收缩变形,降低裂缝产生概率,提升高寒地区混凝土坝的施工

质量和长期稳定性,为类似工程提供可复制的技术经验。

2 高寒地区混凝土坝施工温控防裂的关键影响因素

2.1 高寒地区环境温湿度及昼夜温差影响

高寒地区环境温湿度及昼夜温差是影响混凝土坝施工温控防裂的核心要素,需针对性制定应对策略以保障工程安全。(1) 低温环境对混凝土性能的影响: 极端低温会减缓水泥水化反应速率,延长混凝土凝结时间,若未采取有效保温措施,易导致混凝土内部水分冻结,引发体积膨胀与结构损伤,降低早期强度发展效率。(2) 昼夜温差引发的应力变化: 高寒地区昼夜温差显著,混凝土表面与芯部温度差异大,易形成温度梯度,导致表面收缩快、芯部收缩慢的应力失衡状态,进而产生表面裂缝或深层裂缝,影响结构整体性。(3) 湿度波动对养护效果的影响: 湿度变化直接影响混凝土表面水分蒸发速率,若环境湿度过低,表面失水过快会加剧干缩裂缝风险;若湿度过高,则可能延缓混凝土硬化进程,影响强度形成规律,需通过覆盖保湿材料或喷涂养护剂维持适宜湿度环境。上述因素相互关联,需通过动态监测环境温湿度、调整施工时段、优化养护方案等措施,实现温度与湿度的协同控制,最终降低裂缝发生概率,提升混凝土坝施工质量的稳定性与耐久性。

2.2 混凝土原材料温控特性影响

高寒地区混凝土原材料温控特性直接影响施工期温度控制效果与结构抗裂性能,需从材料特性入手优化温控策略。(1) 水泥水化热特性: 不同品种水泥的水化热释放速率存在差异。低水化热水泥可延缓热量释放峰值,减少混凝土内部温升梯度;而高水化热水泥若未采取控温措施,易导致早期温度过高,引发温差裂缝风险。(2) 骨料热物理性质: 骨料的导热系数、比热容及线膨胀系数影响混凝土温度传递效率。例如,导热系数高的骨料可加速热量散失,但若温差控制不当,可能加剧表面与芯

部的温度差异；热稳定性差的骨料在温度变化时易产生体积变形，增加裂缝风险。(3) 外加剂协同效应：抗冻剂可降低混凝土冰点，防止低温冻结；缓凝剂可调节水化反应进程，避免高温时段水化热集中释放；膨胀剂通过适度膨胀补偿收缩变形，增强界面过渡区密实度，提升抗裂能力。材料特性需在配合比设计中统筹考虑，通过原材料筛选、掺合料复配及外加剂适配，实现从拌合到硬化的全流程温度稳定控制^[2]。最终通过材料特性优化，降低温度应力积累，减少裂缝发生概率，保障高寒地区混凝土坝施工质量的可靠性与结构耐久性。

2.3 混凝土浇筑施工过程温控影响

高寒地区混凝土浇筑施工过程的温控影响需紧扣温度波动与应力平衡，通过动态调整施工参数实现裂缝防控。(1) 入模温度动态调控：混凝土入模温度需与环境温度形成合理梯度，避免温差过大引发瞬时应力。例如，在低温时段浇筑时，可通过预热拌合物或采用温拌技术提升入模温度，减少初始温差对结构的冲击；高温时段则需采取冷却措施，防止热量快速积聚。(2) 浇筑节奏与间歇期管理：连续浇筑需控制单层厚度与浇筑速度，确保热量均匀散失，避免局部过热。间歇期需覆盖可调节的保温层，如可移动保温棚或智能调温毯，根据环境温度变化动态调整保温强度，维持混凝土表面温度稳定。(3) 界面过渡区温控强化：新老混凝土界面是温度应力集中区，需通过界面剂处理、二次振捣或增设抗裂网片等措施增强过渡区密实度，减少因温度差异引发的界面裂缝。这些措施需与高寒地区气候特征深度融合，通过施工参数动态优化、界面处理强化及保温策略升级，实现浇筑过程温度梯度的精准控制，最终降低温度应力积累，提升混凝土坝结构的整体抗裂性能与长期耐久性，保障工程安全稳定运行。

2.4 混凝土坝结构特性与约束条件影响

高寒地区混凝土坝结构特性与约束条件对温控防裂具有显著影响，需结合结构特征制定针对性策略以降低裂缝风险。(1) 坝体几何形态与应力分布：不同坝型（如重力坝、拱坝）的几何形态差异导致温度应力分布规律不同。重力坝因体积庞大，内部热量积聚明显，需加强内部散热设计；拱坝因弧形结构，温度应力分布更复杂，需优化拱圈分块与接缝处理，减少应力集中。(2) 分缝分块设计的约束缓解：通过合理设置横缝、纵缝或诱导缝，可有效释放温度收缩应力。横缝可将大体积混凝土分割为独立坝段，减少连续约束；纵缝则可调整坝体纵向温度变形，避免因约束导致的深层裂缝。(3) 地基与边界约束的应对：地基的刚度及边界条件的固定性会影

响混凝土温度变形自由度。采用滑动层、柔性垫层或设置可变形接缝，可减少地基对坝体的约束力，避免因温度收缩引发的应力集中，降低裂缝发生概率^[3]。通过结构优化、约束缓解及边界处理，结合高寒地区气候特征，实现温度应力的合理分布与释放。这不仅能提升混凝土坝结构的整体抗裂性能与长期耐久性，还能保障工程安全稳定运行，避免因裂缝问题影响结构功能与使用寿命。

3 高寒地区混凝土坝施工温控防裂关键技术措施

3.1 原材料优化与配合比温控技术

高寒地区混凝土坝施工温控防裂需聚焦原材料优化与配合比温控技术，通过科学选材与精准配比实现裂缝防控目标。(1) 骨料预处理：对骨料进行覆盖保温或适度加热，避免低温环境导致拌合物温度骤降；此举可维持骨料温度稳定，提升混凝土拌合均匀性，减少因温度差异引发的早期裂缝风险。(2) 水泥选择与适配：优先选用低水化热水泥，减少水化反应过程中的热量释放，降低混凝土内部温升梯度；或通过掺加粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，改善混凝土和易性与抗裂性能，延长水化热释放周期，避免因热量集中释放引发温度裂缝。(3) 配合比优化：通过调整水胶比、砂率等参数，平衡混凝土强度与抗裂性能。例如，适当降低水胶比可提升混凝土密实度，减少内部孔隙，增强抗裂能力；合理调整砂率可改善混凝土工作性能，确保浇筑过程均匀性，避免因配合比不当引发局部应力集中。以上技术措施需结合高寒地区气候特点，通过精细化原材料选择与配合比设计，实现从原材料到拌合物的全流程温度控制，最终达到防裂目标，提升混凝土坝结构耐久性与安全性，保障工程长期稳定运行。

3.2 施工过程温度控制技术

高寒地区混凝土坝施工温控防裂需围绕施工过程温度控制技术展开，通过多维度措施实现裂缝有效防控。(1) 施工时段优选：结合高寒地区昼夜温差大、低温持续时间长的特点，优先选择日间气温相对稳定的时段进行浇筑作业。此阶段环境温度波动较小，可降低混凝土内外温差，减少温度应力集中风险，保障浇筑质量均匀性。(2) 温度监测网络构建：在浇筑区域布设分布式温度传感器，实时监测混凝土内部及表面温度变化。通过动态数据反馈，及时调整施工策略，如调整养护材料厚度或养护方式，确保温度变化处于合理区间，避免因温度骤变引发裂缝。(3) 应急温控预案：针对突发低温或大风天气，提前制定应急温控方案。例如，采用移动式保温棚或临时加热装置，快速提升局部环境温度；或通过调整配合比，增加早强型外加剂，缩短混凝土初凝时

间,减少暴露在不利环境中的时间^[4]。这些措施需形成系统化操作流程,从施工准备到养护阶段全程跟踪,结合高寒地区特殊气候条件,通过精细化管理与动态响应,实现施工过程温度精准控制,最终达到防裂目标,提升混凝土坝结构耐久性与安全性。

3.3 混凝土养护及抗裂增强技术

高寒地区混凝土坝混凝土养护及抗裂增强需围绕温度稳定与应力均衡展开,通过多环节协同提升抗裂性能。(1) 养护方式适配:采用“内保外护”双层养护策略。内部通过埋设循环水管路调节混凝土芯部温度,避免热量积聚;外部覆盖隔热毯或草帘被,减少表面热量散失,维持内外温差梯度平缓,防止因温差过大引发应力裂缝。(2) 抗裂材料应用:引入合成纤维或微膨胀剂增强混凝土韧性。合成纤维可均匀分散于基体中,形成三维网状结构,提升抗拉强度与抗变形能力;微膨胀剂通过适度膨胀补偿混凝土收缩变形,减少早期收缩裂缝产生。(3) 环境适应性调整:根据昼夜温差变化动态调整养护策略。夜间低温时段加强保温措施,如增设保温棚或加热装置;日间高温时段适当通风降温,避免表面温度骤升导致内外温差失衡。养护全程需持续监测混凝土强度发展及表面状态,及时调整养护参数。上述技术需结合高寒地区气候特征,通过精细化养护流程与材料优化,实现从浇筑到成型全周期的温度与应力控制,最终提升混凝土坝结构抗裂性能,保障工程长期安全稳定运行,避免因裂缝问题影响结构耐久性。

3.4 施工全过程温控监测技术

高寒地区混凝土坝施工全过程温控监测需以数据为驱动,构建覆盖各环节的精准控制网络。具体实施中需把握以下要点:(1) 监测点布设逻辑:依据结构受力特性与温度梯度分布规律,在基础约束区、上下游面、孔洞周边等应力集中区域密集布设温度传感器,形成三维监测网格。传感器间距需结合混凝土厚度动态调整,确

保数据能真实反映温度场变化。(2) 数据采集与智能分析:采用无线传输模块实现温度数据实时同步,通过监控平台自动生成温度变化曲线及梯度分布热力图。结合环境温湿度与混凝土性能参数,系统可动态推演温度应力演化趋势,为施工参数调整提供量化依据。(3) 多级预警与动态响应:设定分阶段温度预警阈值,当监测值接近临界值时,系统自动推送预警信息。施工人员可据此调整浇筑时段、优化保温层厚度或启动温控装置,形成“监测-分析-响应”的闭环控制链^[5]。该技术通过全流程数据追踪与动态调控,可有效提升混凝土坝在极端环境下的施工温度控制精度,抑制裂缝产生,为工程长期稳定运行提供坚实技术保障,体现高寒地区混凝土坝施工温控防裂的核心理念。

结束语:未来,需进一步探索新型抗冻材料,如纳米复合抗冻剂与相变储能骨料,提升混凝土低温抗裂性能;研发智能温控算法,结合机器学习优化浇筑参数,实现温度场动态预测与精准调控;开发自适应养护系统,集成环境传感器与智能调控装置,根据昼夜温差、湿度变化自动调整养护策略,推动技术向更高效、更精准方向发展,为极端环境下的重大工程建设提供坚实支撑。

参考文献:

- [1]何邦旭,沈国武,熊涛.高海拔寒冷地区碾压混凝土大坝温控施工技术研究[J].中国水能及电气化,2023(2):24-29.
- [2]王建,朱振决,郑晓阳.高寒地区碾压混凝土坝温度应力跟踪及蓄水影响分析[J].水利规划与设计,2023(1):123-127.
- [3]杨雁腾.高寒地区混凝土坝冬季施工保温技术探讨[J].传奇天下,2022(14):136-138.
- [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):115-119.
- [5]陕亮,李星.高海拔气候环境下碾压混凝土重力坝施工期开裂风险分析[J].水利水电快报,2023,44(3):66-71.