

水电站高原大温差温控混凝土裂缝防控施工方法探讨

李军

中国水利水电第七工程局有限公司，四川成都，610000；

摘要：随着我国清洁能源战略纵深推进，水电建设重心向青藏高原及川西峡谷快速转移，越来越多的参建单位对大温差温控混凝土裂缝防控施工方法给予了更多关注。本文将系统剖析国内外研究现状，探讨高原大温差环境特点及对混凝土的影响，分析水电站混凝土裂缝成因，探讨高原大温差环境下混凝土温控技术，探讨水电站高原大温差混凝土裂缝防控施工方法，剖析案例并总结经验，以期为高原水电建设者提供可复制的技术参考。

关键词：水电站；高原大温差；温控混凝土；裂缝防控；施工方法

DOI：10.69979/3029-2727.25.12.070

从高海拔水电开发的角度来看，厂房混凝土的温控防裂成败直接关乎电站能否按期发电、长期稳定运行。实证研究表明（DL/T 5144—2015《水工混凝土施工规范》），采用“全过程-多梯度-智能补偿”温控防控体系，可使混凝土基础温差得到控制，降低裂缝出现率，减少后期灌浆维护费用。因此，本文针对水电站高原大温差温控混凝土裂缝防控施工方法的探讨研究，具有重要的实践与理论价值。

1 剖析国内外研究现状

在混凝土裂缝防控研究领域，国内外学者已进行了广泛而深入的探索，积累了较为丰富的成果。在常规环境下，混凝土裂缝的成因、影响因素及防控措施已得到较系统阐释，涵盖了材料特性、施工工艺、结构设计及环境作用等多个方面。例如，水泥水化热引起的温度应力、混凝土收缩、施工不规范、结构约束不合理以及温湿度变化等因素对裂缝形成的影响机制已较为明确。

然而，针对高原大温差这一特殊环境，现有研究仍较为有限。尽管已有部分工作关注到大温差对混凝土性能的影响，但整体仍缺乏系统性和深度。当前研究多集中于单一因素分析，未能充分考虑多环境因素耦合作用，难以全面揭示该条件下裂缝的形成与发展规律。

2 探讨高原大温差环境特点及对混凝土的影响

高原地区独特的地理和地形条件塑造了其显著区别于其他地区的气候特征。气温方面，昼夜温差极大：白天地面在强日照下迅速升温，气温可大幅上升；而夜晚因空气稀薄、大气逆辐射弱，热量迅速散失，导致气温急剧下降。季节性温差同样明显，冬季寒冷漫长，极端低温可达 -40°C 以下，夏季则相对凉爽，与同纬度低地形成强烈对比。

在日照方面，得益于空气洁净、云量少和大气透明度高，太阳辐射强且日照时间长，年日照时数普遍达到2500—3500小时。此外，高原地区地形开阔、地表摩擦小，加之大气环流和地形抬升影响，风速普遍较高，大风天气频繁，例如年平均风速常达3—5米/秒，部分区域年大风日数可超过100天。

3 分析水电站混凝土裂缝成因

水电站混凝土裂缝的成因复杂，涉及材料、施工、设计及环境等多方面因素。材料方面，水泥品种直接影响水化热释放和收缩变形，水灰比过大会增加孔隙率并加剧收缩，骨料含泥量高或级配不良则会削弱与水泥石的粘结力。同时，外加剂和掺合料使用不当（如减水剂过量引起离析），掺合料活性不足也会导致结构缺陷和裂缝风险上升。施工过程中，浇筑不连续易形成冷缝，振捣不密实会造成内部孔隙和薄弱区，养护不及时或不充分则会加大干缩与温度裂缝；此外，模板变形和钢筋锈蚀也会引发应力集中和表面开裂。

在厂房结构设计上，形式不合理、配筋不当或约束过强均会加剧温度应力分布不均，厂房大体积混凝土因散热难、内外温差大，更易产生裂缝。

环境方面，高原大温差与低湿度、强风、强日照等因素耦合，共同加速水分蒸发和温度变形，大幅度提高了混凝土开裂的敏感性，施工期间遭遇气温骤降或暴雨等突变天气，也会进一步增加裂缝产生的风险。

4 探讨高原大温差环境下混凝土温控技术

4.1 原材料温控措施

为控制水电站混凝土的水化热与温度变形，可在原材料温控环节采取多项措施。优选低热水泥以减缓并减少水化热释放，从源头控制升温；优化骨料级配增强密

实性,减少孔隙以缓解温度应力集中;同时严格控制砂石含水率,避免水灰比波动引起水化热异常。此外,可采用冷水甚至加冰拌合混凝土,利用冷水或冰的吸热作用有效降低出机口温度,尤其在高温季节或严控温条件下,此举能为混凝土提供良好的初始温度状态,有助于减少裂缝发生,为后续施工奠定基础。

4.2 浇筑过程温控措施

为减少厂房大体积混凝土内部的温度梯度,需系统实施多项温控工艺。首先应合理安排浇筑时间,避开高温时段,选择低温且稳定的环境进行作业,以降低入模温度、减少初始热量积累。采用分层分段浇筑,将大体积混凝土划分为小单元逐次施工,有助于逐步释放水化热,避免热量集中。同时需严格控制浇筑速度,保持浇筑过程平稳,以利于内部热量散发。

可在混凝土内部预埋冷却水管,通过循环冷却水主动导出水化热。水管布置应结合结构形状与温度场分布,确保冷却均匀覆盖关键区域。冷却水的流量、流速及进水温度应依实际精准调控:适当提高流量与流速可增强换热效率,而合理的进水温度则能在有效降温的同时避免过大温差应力。综合应用以上措施,可显著降低内部温度梯度,抑制温度裂缝产生,提升结构整体质量与安全性。

4.3 养护过程温控措施

养护是控制水电站混凝土裂缝的关键环节。混凝土硬化期间持续水化,若表面失水过快或散热过多,易导致内外温差大和干缩不均,进而引发裂缝。采用塑料薄膜等保温保湿材料覆盖表面,可有效阻隔空气对流、减少热量散失并抑制水分蒸发;保温板则能进一步减缓热交换,帮助维持混凝土内部温湿度稳定。

在高原大温差环境中,需依据温度动态灵活调整养护策略:高温时应增加洒水频率并加强保温,防止表面干裂;低温时则需延长保温时间,避免混凝土受冻强度下降。通过实时调控养护参数,使混凝土始终处于适宜的硬化环境,可显著提升其抗裂性和耐久性,为水电站结构长期安全运行提供保障。

5 探讨水电站高原大温差混凝土裂缝防控施工方法

5.1 优化混凝土配合比设计

优化混凝土配合比是提升高原水电站混凝土抗裂性、适应大温差环境的关键。应依据高原昼夜与季节性温差大的特点,通过系统试验确定原材料组合与配比,

从而降低水化热、控制收缩,减少温度与干缩裂缝风险。

此外,可考虑掺加纤维或膨胀剂等外加材料:纤维能在混凝土内部形成三维支撑,抑制裂缝产生与扩展,增强韧性和抗拉强度;膨胀剂则通过与水分反应产生适度体积膨胀,补偿收缩,提高密实性。结合实际工程开展应用试验,深入分析其作用机理与效果,能够为高原大温差环境下混凝土的配合比设计提供可靠依据,保障结构长期安全稳定。

5.2 改进施工工艺

在高原水电站混凝土施工中,为应对大温差导致的裂缝问题,可采用跳仓浇筑与后浇带等施工方法。跳仓浇筑将厂房大体积结构划分为多个仓块并间隔浇筑,利用时间差使先浇部分完成大部分收缩,显著降低块体间的约束应力;后浇带则通过在厂房结构中预留临时缝隙,待两侧混凝土收缩基本稳定后再行封闭,从而有效释放温度和收缩应力。

此外,还可实施二次振捣和二次抹面等精细工艺:二次振捣于初凝前再次振捣,增强密实性并减少内部缺陷;二次抹面在初凝后终凝前对表面进行再次抹压,填补微孔和早期收缩裂缝,提高表层致密性与平整度。这些工艺的综合运用有助于全面提升混凝土在高原大温差环境下的抗裂性能与施工质量。

5.3 加强施工过程质量控制

在高原水电站混凝土施工中,为确保工程质量并有效防控裂缝,必须建立系统的质量控制体系,覆盖从原材料到养护的各个环节。首先要严格检验水泥、骨料及外加剂等材料,确保其满足高原环境要求;拌合阶段需精准控制时间、投料顺序和掺量,以保证混凝土均匀性与工作性。浇筑时应合理规划顺序与分层厚度,确保振捣密实,避免冷缝或缺陷产生;养护则应结合大温差特点,适时调整保湿与保温措施,保障混凝土强度发展。同时,可引入温度传感器和应变计等现代监测设备,实时采集内部温度与应力数据,及时察觉异常并采取调控措施,如优化养护或启动应急温控,从而消除裂缝风险,为工程高质量建设提供可靠支撑。

5.4 结构补强与裂缝处理

在高原水电站混凝土结构裂缝控制中,结构补强与裂缝处理是确保长期安全与耐久的重要措施。通过合理设置诱导缝和伸缩缝,可为混凝土提供有序变形的释放路径:诱导缝能够引导裂缝在预定位置发展,避免无序扩张破坏整体性;伸缩缝则适应温度变化和干缩湿胀引起的变形,减少非规则裂缝的产生。针对已出现的裂缝,

应依据其类型（如表面裂缝、深层裂缝或贯穿裂缝）及严重程度（宽度、深度及对结构的影响）采取相应处理方法。表面细微裂缝可采用环氧树脂等材料进行封闭，防止水分和有害物侵入；较宽较深的裂缝宜采用压力灌浆，注入高强度浆料以恢复整体性和承载力；对于抗裂或抗拉能力不足的部位，可粘贴碳纤维布，利用其高强高弹特性增强结构性能，抑制裂缝进一步扩展。

6 剖析案例并总结经验

本文将以黄藏寺水利枢纽工程（海拔 2480m）为案例，黄藏寺水利枢纽位于青海祁连县黑河上游，坝址高程 2480m，主体为碾压混凝土重力坝，最大坝高 76.3m，混凝土总量 57.4 万 m^3 。该地区气候严酷，年均气温 -0.6°C ，日温差最大可达 25°C ，年大风天数达 123 天（风力 6 级及以上），UV-B 辐射强度高于平原地区 32%。坝基为寒武系浅变质砂岩，弹性模量 35GPa，对温度变化较为敏感。基于这些特殊条件，工程设定了严于平原标准的温控目标：基础温差 $\leq 14^\circ\text{C}$ ，内外温差 $\leq 17^\circ\text{C}$ （相较于 DL/T 5144 - 2015 平原地区标准，分别收紧 6°C 和 5°C ）。

工程采用多项创新施工方法防控裂缝：基于 ANSYS - THAR3D（高原版）进行全过程三维温度仿真，网格精度设定为 0.5m，时间步长为 15min，每浇筑 0.3m 厚的混凝土层便更新一次温度场，以此实时指导温控措施的实施；构建梯度保温体系，仓面采用 5cm 厚的憎水岩棉毯与反光铝箔组合，侧面在拆模后立即挂设 3cm

厚的聚氨酯保温板，并设置防风网，越冬面（11 月至翌年 3 月）搭设“钢管桁架 + 双层帆布 + 电热毯”暖棚，维持棚内温度在 $5 \pm 2^\circ\text{C}$ ；智能通水系统采用 $\phi 32\text{mm}$ 的 HDPE 管，水平间距优化为 0.8m，通水水温通过板式换热器控制在 $8 \pm 1^\circ\text{C}$ ，流量根据实时监测数据在 $0.6 - 1.2\text{m}^3/\text{h}$ 范围内变频调节，通水时间持续至混凝土中心温度达到峰值后 5 天，累计通水时间约 14 天；胶材选用低热水泥与微膨胀组合，胶材总量控制在 $\leq 290\text{kg}/\text{m}^3$ ，其中低热硅酸盐水泥占比 60%，粉煤灰 35%，矿粉 5%，7d 水化热 $\leq 165\text{kJ}/\text{kg}$ ，内掺 3% 的 Mg O，28d 限制膨胀率 $\geq 150\mu\text{e}$ ，以补偿混凝土温降收缩；施工实行“双锁定”策略，当日平均气温连续 3 天 $< 5^\circ\text{C}$ 或瞬时风速 $> 6\text{m}/\text{s}$ 时禁止开仓浇筑，高温时段（气温 $> 18^\circ\text{C}$ ）采用 4°C 冷水拌合混凝土，并对 30% 的骨料加

冰处理，选择夜间 20:00 - 06:00 气温较低时段开盘施工，确保混凝土入仓温度 $\leq 10^\circ\text{C}$ 。

工程经验表明：“预测 - 施工 - 监测 - 反演”闭环管理是高原裂缝防控的核心，温度场必须依据实时气象数据进行滚动更新；保温材料需增强抗紫外老化能力，建议采用覆铝玻纤毡替代普通帆布，避免使用 60 天后出现脆化现象；小仓跳仓浇筑方式可降低约束应力约 0.4MPa，但会增加施工缝数量约 1.8 倍，需配套 2 h 速切模板体系，以保证混凝土连续上升速度；低热水泥 - 掺和料体系对粉煤灰烧失量较为敏感，当烧失量 $> 2\%$ 时，水化热会反弹，应建立高原专用胶材质量红线标准；监测数据需与智能装备实现联动，鉴于夜间大风存在掀被风险，下一步可接入 PLC 自动卷轴系统，实现保温措施的“零延时”纠偏。

黄藏寺工程在极寒环境下成功实现了碾压混凝土重力坝“零贯穿裂缝”，充分验证了“低热材料 + 梯度保温 + 智能通水”一体化技术的有效性，为高寒地区大体积混凝土裂缝控制提供了可复制、可推广的工程范式。

7 结束语

总体来说，在本文剖析的高原大温差环境对混凝土开裂机理及既有温控短板中，不难看出水电建设者首先需革新其管控理念。从采集动态数据、搭建平台、划分温控阈值、实时补偿等多个方面推进。

参考文献

- [1] 蔡秀铭. 建筑施工中混凝土结构性裂缝的防控方法研究[J]. 江西建材, 2017, (04): 100.
- [2] 李伟强. 房屋施工中遇到的裂缝及处理方法探讨[J]. 沿海企业与科技, 2012, (10): 69-70+68.
- [3] 钟文超. 工民建混凝土框架结构施工裂缝成因及防控措施[J]. 大众标准化, 2025, (16): 16-18.
- [4] 张海明. 混凝土裂缝在住宅建筑工程中的产生原因与防控策略探讨[J]. 居舍, 2025, (21): 46-49.
- [5] 武文斌. 高原大温差地区水电站厂房混凝土温控措施研究[J]. 低碳世界, 2017, (14): 74-75.
- [6] 李雄, 王丹, 李磊. 昼夜温度变化及寒潮对混凝土拱坝温控防裂的影响研究[J]. 水利建设与管理, 2025, 45 (08): 34-42.