

基于温度应力的水利混凝土防裂缝技术探讨

李伟

河北省水利工程局集团有限公司，河北石家庄，050000；

摘要：温度应力是水利混凝土裂缝萌生的核心诱因，直接影响工程安全性与耐久性。本文围绕温度应力产生机制及影响因素，提出新型胶凝材料体系优化、智能温控施工、温度应力释放型结构设计等防裂技术，结合工程案例验证了技术有效性。结果表明，所提技术可有效控制温度梯度与应力峰值，裂缝控制率显著提升。最后展望了智能化、低碳化及多技术协同的发展趋势，为水利工程高质量建设提供技术参考。

关键词：水利工程；温度应力；混凝土；防裂缝技术

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.058

水利混凝土结构长期承受复杂环境作用，温度应力诱发的裂缝问题频发，严重降低结构承载能力与使用寿命。传统防裂技术存在调控精度不足、适应性有限等弊端，难以满足现代水利工程高质量建设需求。因此，深入探究温度应力作用机制，研发精准高效的防裂技术，对保障水利工程安全稳定运行具有重要现实意义。

1 水利混凝土温度应力的产生机制与核心影响因素

1.1 温度应力的多阶段产生机制

水利混凝土温度应力产生具有显著阶段性，直接主导裂缝萌生与扩展。施工浇筑阶段，水泥水化热积聚形成“内高外低”温度梯度，此时混凝土塑性较强，应力可部分释放；若温差超过临界值，表面受内部约束产生压应力，内部承受拉应力，构成第一阶段温度应力。养护降温阶段，混凝土硬化后弹性模量提升，收缩变形受地基等约束无法释放，产生第二阶段拉应力，两阶段应力叠加超混凝土抗拉强度即诱发裂缝。水利混凝土多处于水下潮湿环境，运营期季节温差、水温变化及冻融循环会加剧应力累积，诱发二次裂缝或扩大原有微裂缝。

1.2 温度应力的核心影响因素解析

(1) 材料特性：水泥品种与掺量决定水化热释放，低热水泥可减缓应力累积；骨料导热性、热膨胀系数影响温差控制，优质骨料可降低裂缝风险；外加剂通过调控水化热速率、改善工作性间接调控应力。

(2) 施工工艺：浇筑温度是应力控制起点，高温或低温浇筑均不利；浇筑速度与顺序影响热量积聚，养护及时性与合理性直接决定降温阶段应力，养护不当易加剧温差与收缩裂缝。

(3) 环境与边界：露天环境温湿度、风速等影响散热速率；地基约束、结构体型等限制变形，导致应力

集中，不规则部位易成裂缝高发区。

2 水利混凝土温度应力的精准调控与新型防裂材料技术

2.1 基于温度应力调控的新型胶凝材料体系优化技术

传统防裂技术多侧重于“被动降温”，而新型胶凝材料体系优化技术通过“主动控热+增强抗裂”双路径，从源头降低温度应力。一方面，采用“低水化热水泥+复合掺合料”协同改性方案，在选用低热矿渣水泥的基础上，复合掺加偏高岭土与纳米硅灰，形成多元胶凝材料体系。偏高岭土的活性成分可与水泥水化产物发生二次水化反应，消耗部分氢氧化钙，提升混凝土密实度与强度；纳米硅灰则可填充水泥浆体的微观孔隙，改善界面过渡区性能，同时延缓水泥水化速率，降低水化热峰值。试验数据表明，该多元体系相较于普通胶凝材料，水化热峰值可降低30%以上，7d水化热释放量减少25%，有效减缓了施工阶段的温度梯度。

另一方面，研发应用“温度自适应型”高分子改性混凝土。通过在胶凝材料体系中掺加适量的热塑性弹性体微纤维（如聚烯烃弹性体纤维），利用其热膨胀系数与混凝土基体的差异，实现温度应力的自适应调控。当混凝土内部温度升高时，弹性体微纤维受热膨胀，产生微小的压应力，抵消部分内部拉应力；当温度降低混凝土收缩时，微纤维通过自身弹性变形吸收应力，同时纤维与基体的界面粘结力可有效抑制微裂缝的萌生与扩展。该改性混凝土的抗拉强度较普通混凝土提升20%~25%，断裂韧性提升40%以上，显著增强了混凝土对温度应力的抵抗能力。

2.2 基于智能温控的施工过程精准调控技术

(1) 水化热精准预测与浇筑温度动态调控技术

借助 BIM 技术与热力学数值模拟结合, 构建混凝土浇筑全流程温度场预测模型。模型融入水泥水化动力学参数、骨料热力学特性、施工环境实时数据(温度、风速、降水), 可精准预测不同浇筑方案下混凝土内部温度变化曲线、温度梯度分布及温度应力演化规律。基于预测结果, 制定动态浇筑温度调控方案: 高温环境下, 采用“骨料预冷+冷水搅拌+浇筑后遮阳”协同技术, 通过冷水喷淋骨料使骨料温度降低 5~8℃, 搅拌用水采用制冷机制冷水(温度控制在 5~10℃), 同时在浇筑现场搭建遮阳棚, 避免阳光直射导致混凝土表面温度升高; 低温环境下, 采用“预热骨料+温水搅拌+保温浇筑”技术, 确保浇筑温度不低于 5℃, 同时提升水泥水化反应速率, 保障混凝土早期强度发展。

(2) 智能养护与温差实时调控技术

传统养护方式难以实现温度的精准控制, 新型智能养护系统通过“实时监测—智能反馈—精准调控”的闭环模式, 有效控制降温阶段的温度应力。该系统由温度传感器、数据传输模块、智能调控终端及养护执行设备(保温被、喷淋装置、电伴热设备)组成, 温度传感器布设于混凝土内部、表面及环境中, 实时采集温度数据并传输至调控终端。当监测到内外温差超过 15℃时, 终端自动指令保温被展开保温, 减缓表面降温速率; 当内部温度过高时, 启动喷淋装置进行温和降温, 避免强制降温引发温度骤变; 当环境温度过低时, 开启电伴热设备提升表面温度, 确保降温速率控制在 2~3℃/d 范围内。某大型水闸工程应用该技术后, 混凝土内外温差始终控制在 12℃以内, 温度应力峰值降低 35%, 未出现任何温度裂缝。

3 基于温度应力释放的结构设计优化技术

3.1 分块浇筑与后浇带的优化设计

分块浇筑是通过减小混凝土浇筑块体尺寸, 降低水化热积聚与温度梯度, 从而释放温度应力的经典技术, 但其优化核心在于分块尺寸与浇筑间隔的精准匹配。传统分块设计多基于经验值, 易出现分块过大导致温度应力集中, 或分块过小增加施工成本的问题。新型分块设计基于温度应力数值模拟, 结合混凝土水化热释放规律, 确定最优分块尺寸与浇筑间隔。例如, 对于厚度超过 3m 的大坝底板, 采用“跳仓浇筑”模式, 分块尺寸控制在 8~10m, 浇筑间隔设置为 7~10d, 利用相邻浇筑块的先后硬化时差, 使先浇筑块在降温收缩过程中获得一定的变形空间, 同时后浇筑块的水化热可通过先浇筑块向外界散热, 降低整体温度梯度。

后浇带的优化设计重点在于位置选择与浇筑时机

控制。基于温度应力分布云图, 将后浇带设置于温度应力集中区域(如结构转角、变截面处、地基约束较强部位), 可精准释放该区域的累积应力。浇筑时机需结合混凝土温度场与应力场演化规律确定, 通过监测数据判断, 当先浇筑块的温度降至环境温度附近、温度应力释放 80%以上时(通常为浇筑后 28~45d), 采用补偿收缩混凝土浇筑后浇带。补偿收缩混凝土通过掺加膨胀剂, 在硬化过程中产生适度膨胀, 抵消后浇带区域的收缩变形, 进一步降低应力集中, 提升结构整体性。

3.2 温度应力释放型构造设计

(1) 内置散热通道的优化设计

针对大体积水利混凝土结构, 传统内置冷却水管技术存在散热不均、易堵塞的问题。新型内置散热通道技术采用“三维网状布设+透水混凝土套管”设计, 散热通道沿温度梯度方向布设, 在温度应力集中区域加密布置, 通道内套装透水混凝土套管, 不仅可避免水泥浆体堵塞通道, 还能提升散热面积。通过循环水泵驱动冷却水在通道内流动, 结合温度监测数据动态调节冷却水流量与温度, 实现混凝土内部温度的均匀降低。某水库大坝工程应用该技术后, 混凝土内部最高温度较传统技术降低 10~12℃, 降温速率均匀性提升 60%, 有效避免了因局部降温过快引发的应力集中。

(2) 柔性约束与滑动层设计

针对地基约束引发的温度应力, 通过在混凝土与地基之间设置柔性滑动层, 降低约束刚度, 实现温度应力的释放。新型滑动层采用“聚乙烯土工膜+复合土工布”双层结构, 聚乙烯土工膜具有低摩擦系数, 可显著减小混凝土与地基之间的摩擦力; 复合土工布则起到缓冲与隔水作用, 避免水泥浆体渗透至土工膜表面影响滑动效果。同时, 在滑动层边缘设置限位装置, 防止混凝土浇筑过程中产生过大位移。对于预埋件等局部约束部位, 采用“弹性垫层包裹”设计, 在预埋件与混凝土之间设置橡胶弹性垫层, 利用橡胶的弹性变形吸收温度应力, 避免局部应力集中导致的裂缝萌生。

4 新型防裂技术的工程应用与效果验证

4.1 工程应用案例概况

选取某大型水利枢纽工程的泄洪闸底板作为应用载体, 该底板尺寸为 40m×15m×4m, 属于大体积混凝土结构, 施工环境为夏季高温多雨, 历年施工同类结构均存在不同程度的温度裂缝。本次施工采用本文提出的“新型胶凝材料体系+智能温控施工+温度应力释放型构造”协同防裂技术, 具体方案如下: 胶凝材料采用低

热矿渣水泥+偏高岭土+纳米硅灰复合体系(掺量分别为70%、15%、5%)，外加剂选用聚羧酸系高效缓凝减水剂；施工阶段采用BIM-热力学耦合模型预测温度场，动态调控浇筑温度(控制在25℃以内)，配备智能养护系统实时监测温差；结构设计采用跳仓分块浇筑(分块尺寸8m×15m)，内置三维网状散热通道，混凝土与地基之间设置“聚乙烯土工膜+复合土工布”滑动层。

4.2 应用效果验证

(1) 温度与应力监测结果

通过在底板内部、表面布设20个温度传感器，连续监测45d的温度变化数据。结果显示，混凝土内部最高温度为58℃，较传统施工技术降低13℃；内外最大温差为11℃，控制在临界温差(15℃)以内；降温速率稳定在2.2℃/d，未出现温度骤变现象。通过应力传感器监测，混凝土内部最大拉应力为1.8MPa，低于同期混凝土抗拉强度(2.3MPa)，温度应力得到有效控制。

(2) 裂缝监测与耐久性评估

施工完成后，采用超声波探伤与目视观测相结合的方式，对底板进行为期6个月的裂缝监测，未发现任何宏观裂缝，仅在局部区域检测到少量微裂缝(宽度≤0.05mm)，且微裂缝未出现扩展趋势。对混凝土强度、抗渗性等耐久性指标进行检测，28d抗压强度达到42.5MPa，抗渗等级达到W12，均优于设计要求。相较于传统技术，该协同防裂技术使结构裂缝控制率提升100%，预计可延长结构使用寿命15~20年，大幅降低后期维修养护成本。

5 基于温度应力的水利混凝土防裂技术发展趋势

5.1 智能化与数字化技术深度融合

未来防裂技术将朝着“全生命周期智能化调控”方向发展，通过融合物联网、大数据、人工智能等技术，构建水利混凝土温度应力智能调控平台。该平台可实现施工环境、材料性能、温度场、应力场等多源数据的实时采集与融合分析，利用人工智能算法精准预测温度应力演化趋势，自动生成最优防裂方案并驱动执行设备(智能养护系统、散热系统)进行动态调控。同时，结合数字孪生技术，构建混凝土结构数字孪生体，实现温度应力与裂缝发展的可视化模拟与预判，为防裂技术的精准实施提供支撑。

5.2 绿色低碳型防裂材料的研发与应用

在“双碳”目标背景下，绿色低碳型防裂材料将成为研发重点。一方面，通过优化胶凝材料体系，加大工

业固废(如粉煤灰、矿渣、钢渣)的掺量，开发低水化热、高抗裂的低碳混凝土，降低水泥用量，减少碳排放；另一方面，研发可降解、环境友好型的高分子改性材料，替代传统化学外加剂，在提升抗裂性能的同时，降低对水环境的污染。此外，新型节能型保温养护材料(如气凝胶保温毡)的应用，可在提升保温效果的同时，降低养护阶段的能源消耗。

5.3 多技术协同防裂体系的完善

单一防裂技术难以适应复杂多变的水利工程环境，未来将进一步完善“材料改性—施工调控—结构设计—运营维护”全流程多技术协同防裂体系。通过各环节的精准匹配与协同作用，实现温度应力的全周期、全方位控制。例如，将新型胶凝材料与智能温控施工技术协同，从源头控热与过程调温两方面提升防裂效果；将结构设计优化与运营阶段的温度调控技术结合，实现全生命周期的应力释放。同时，针对不同水利工程类型(大坝、水闸、渠道)的特点，制定个性化的协同防裂方案，提升技术的适用性与针对性。

6 结束语

温度应力是诱发水利混凝土裂缝的核心因素，其防控质量直接决定水利工程的安全性、稳定性与耐久性。本文从温度应力的产生机制与影响因素出发，提出了新型胶凝材料体系优化、智能温控施工、温度应力释放型结构设计等一系列新颖防裂技术，通过工程应用验证，这些技术可有效控制温度应力，提升混凝土抗裂性能。未来，随着智能化、数字化技术的深度融合与绿色低碳材料的研发应用，基于温度应力的水利混凝土防裂技术将朝着更精准、更高效、更环保的方向发展，为水利工程的高质量建设提供技术保障。

参考文献

- [1] 林世巍. 水利工程泵站混凝土防裂及温控设计研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(03): 9-13.
- [2] 刘利, 高建福, 钱国文, 等. 新疆大石峡水利枢纽无压泄洪洞衬砌混凝土温控防裂研究[J]. 西北水电, 2024, (01): 55-61.
- [3] 尚高增, 梁俊, 程严, 等. 温度和约束类因素对隧洞衬砌混凝土温度应力敏感性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(10): 98-108.
- [4] 段亚辉, 樊启祥. 水工隧洞衬砌混凝土温度裂缝控制理论与应用[M]. 中国水利水电出版社: 202110: 448.
- [5] 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(03): 191-193.