大体积水工混凝土温控防裂施工技术与应用研究

李祥健　王　坤　赵　建

连云港裕源水利工程有限公司　江苏　连云港　222100

摘　要：大体积水工混凝土因胶凝材料水化放热集中、热传导性能差，施工期温度裂缝问题长期制约着水工结构的耐久性与安全性。本文系统梳理了大体积水工混凝土温度裂缝的成因机理，从材料调控、施工工艺与智能监控三个维度阐述了温控防裂技术体系。研究表明，低热水泥复合粉煤灰和矿渣粉的三元胶凝体系可使绝热温升峰值降低约22%，温升抑制剂可将水化放热峰延缓 10 小时、峰值降低近 40%；冷却水管间距从 3.0 米加密至 1.5 米可降低内部最高温度近 4℃；智能通水与双层柔性保温协同可将最大内外温差由 26.3℃压缩至 14.2℃，裂缝发生率由 12.5%降至0.8%。基于约束度动态反馈的闭环控制策略代表了温控技术从经验驱动向数据驱动转型的方向。

关键词：大体积混凝土；温控防裂；通水冷却；温度应力；施工技术

引言

水工混凝土结构普遍具有截面尺寸大、水泥用量多、浇筑连续性强等特点，其施工期的温度控制问题始终是工程质量管控的核心环节。大体积混凝土在硬化过程中，胶凝材料水化释放的大量热量因混凝土导热系数较低而难以有效散逸，导致内部温度持续攀升，部分工程内部最高温度可达 80℃以上。与此同时，混凝土表面热量散失较快，形成显著的内外温差。这种不均匀的温度分布诱发的热拉应力一旦超过混凝土当期抗拉强度，便会产生温度裂缝。裂缝的形成不仅削弱结构的整体力学性能，更为有害离子的侵入提供通道，严重降低水工结构的耐久性与服役寿命。自 1931 年美国 Owyhee 大坝首次系统采用水管冷却技术以来，大体积混凝土温控技术经历了从单一措施向综合调控、从人工经验向智能决策的演进历程。然而，随着水利工程建设规模持续扩大、结构形式日益复杂、施工环境愈发严苛，温控防裂技术仍面临诸多挑战。本文立足于施工技术视角，从裂缝成因、材料调控、工艺优化与智能监控等方面，对大体积水工混凝土温控防裂技术进行系统论述。

1 温度裂缝的成因机理与影响因素

1.1 水化热温升与温度梯度

大体积混凝土温度裂缝的根源在于水化热引起的温度变形受到约束。水泥水化过程中释放的热量使混凝土温度升高，其绝热温升值与胶凝材料用量、品种及掺合料比例密切相关。以 C30 混凝土为例，每立方米水泥用量约 340kg、42.5 号矿渣水泥的水化热量约 335J/kg 时，3 天龄期绝热温升可达 29.3℃，至 12 天时趋于峰值约 48.0℃。当混凝土内部温度达到峰值后逐渐下降，而表面温度则随环境气温波动，形成内部高温、表层低温的温度梯度[1]。这种非线性温度分布使混凝土各部分产生差异膨胀或收缩，在结构内部形成自约束应力，在基础部位则叠加外部约束应力，共同构成开裂的驱动力。

1.2 内外温差与降温速率

内外温差是表面裂缝产生的直接诱因。内部混凝土膨胀受到表层已冷却混凝土的约束，使表面承受拉应力。研究表明，当内外温差超过约 20℃至 25℃时，表面拉应力即可接近甚至超过混凝土的早期抗拉强度。此外，通水冷却后期的降温速率同样关键：若降温过快，混凝土收缩受到基础或老混凝土约束，将在强约束区产生深层贯穿裂缝。降温速率宜控制在 2.0℃/d 以内，部分工程实践中进一步收紧至 1.0℃/d。有学者推导的通水瞬间管壁拉应力公式表明，中后期冷却时混凝土与水温差以不大于 10℃为宜，否则管壁周围易产生微裂纹并可能扩展为有害裂缝。

1.3 外部约束与浇筑块尺寸

基础约束是温度裂缝的另一关键因素。浇筑块底面与基岩或老混凝土接触，当混凝土降温收缩时，接触面摩阻力与咬合力形成约束，在块体中部产生拉应力。约束程度与浇筑块长边尺寸、基岩弹模及接触面粗糙度相关。浇筑块越长、基岩越坚硬，约束越强，开裂风险越高。有研究量化区分了表层自约束浅层裂缝与基岩强约束深层裂缝的双重机制，前者受内外温差主导，后者受约束度与降温幅度控制。因此，合理分缝分块、控制浇筑层厚度与间歇时间，是削减约束

应力的重要施工手段。

2 材料调控技术

2.1 低热胶凝材料体系

降低混凝土绝热温升的根本途径在于减少胶凝材料的水化放热量。采用低热硅酸盐水泥替代普通硅酸盐水泥是有效手段，其 C_2S 含量较高、C_3A 含量较低，水化热显著低于普通水泥。在此基础上，大掺量粉煤灰或矿渣粉的复合掺入可进一步降低早期放热速率与峰值温升。研究表明，低热水泥复合粉煤灰和矿渣粉的三元胶凝体系可使结构绝热温升峰值降低约 22%，72 小时累计放热量降低约 32%。典型配合比中，低热水泥、粉煤灰、矿渣粉的用量分别为 180、72、48kg/m³，胶凝材料总量控制在 300kg/m³ 以内。粉煤灰的形态效应与火山灰效应还改善了混凝土拌合物的和易性，有利于降低单位用水量，间接减少水化热源。

2.2 外加剂与相变材料应用

温升抑制剂与相变储能材料的引入为温控提供了新路径。新型多聚糖类水化温升抑制剂通过调控水泥矿物的溶解与结晶过程，可将水化放热峰降低近 40%，峰值出现时间延缓 10 小时，使热量释放更为平缓。相变材料则利用其相变潜热吸收水化热，在特定温度区间内发挥“削峰填谷”作用[2]。有研究设计了基于相变储能材料的复合型温控抗裂外加剂，在控温限差及提升抗裂性方面展现出协同效应。此外，钙镁复合型膨胀剂的应用实现了不同阶段的收缩补偿，进一步提升了混凝土的抗裂储备。

2.3 配合比优化策略

在满足强度与耐久性指标的前提下，优化混凝土配合比以减少单位水泥用量是温控的基础性措施。具体策略包括：采用大掺量矿物掺合料替代水泥，粉煤灰掺量控制在 20%左右、矿渣粉掺量控制在 15%左右为较优窗口；选用连续级配骨料并控制最大粒径在 40mm 以内，降低空隙率与用水量；水胶比控制在 0.40 左右，砂率约 40%；掺入聚羧酸高性能减水剂以减少拌合用水，进而降低水泥浆体体积占比。需要指出的是，掺合料的大量掺入会导致早期强度发展减缓，需在温控效益与施工进度之间寻求平衡。

3 施工工艺与控制措施

3.1 浇筑温度控制

降低混凝土浇筑温度是削减最高温升的首要环节。浇筑温度每提高 2℃，坝体混凝土最高温度约增加 0.8℃至 1.2℃，最大拉应力相应增大 0.2MPa 至 0.3MPa，开裂风险显著上升。施工中通常采取骨料预冷、加冰拌合、低温水拌合等措施控制出机口温度，混凝土入模温度不宜大于 28℃。大型工程中，智慧拌合工厂的预冷系统可将骨料温度从常温降至 8℃以下，配合 5℃冷水和片冰拌合，使出机温度控制在 16℃以下。运输与浇筑过程中通过仓面喷雾、覆盖隔热等方式减少温度回升。对于高温季节施工，应尽量安排在夜间或清晨进行浇筑，避开日间高温时段。

3.2 分层分块与浇筑间歇

浇筑层厚度与间歇时间直接影响水化热的散逸效率与约束应力的发展。对于强约束部位，采用“薄层台阶式”浇筑工艺可将单层浇筑厚度缩减至 1.5 米左右，层间间歇期控制在 5 至 7 天，使水化热通过分层分次释放得以充分削峰。大型承台工程中，承台分三层浇筑、每层 3m 的实践表明，分层策略配合层间散热可有效控制温度梯度。薄层浇筑增加了散热面，同时降低了单层混凝土的温度梯度与约束程度。但层间间歇时间不宜过长，否则新老混凝土温差过大反而增加约束应力，且层面处理不当易形成薄弱面。在平陆运河枢纽工程中，闸室墙面特意留设宽缝，将巨大结构“化整为零”，先浇块体各自充分收缩冷却后再用新混凝土回填，有效释放了约束应力。

3.3 通水冷却技术

通水冷却作为主动降温手段，贯穿于大体积混凝土施工的全过程。初期冷却旨在削减水化热温升峰值，通常在混凝土浇筑后立即通水，持续至温升趋于平缓。中后期冷却则着眼于控制降温速率与内外温差，使混凝土温度逐步降至稳定温度。冷却水管材质、间距、水温与流量是关键控制参数。有限元敏感性分析表明，冷却水管间距从 3.0 米加密至 1.5 米可降低内部最高温度近 4℃；通水水温降低 2℃，最高温度可降低约 0.5℃至 0.7℃。工程实践中，冷却水管采用竖向 2 层、水平间距 1.25m 的布设方案，单管流量控制在 10L/min 至 20L/min，持续通水 12 天[3]。大连新机场跨海通道工程中，承台内部布设三层立体冷却水管网络，水平与竖直间距均严格控制在 1 米，层间采用纵横交错布局，确保温控范围全覆盖。冷却过程的精细化调控尤为重要。初期冷却时混凝土温度较高，冷击风险相对较小；中后期冷却则需严格控制水温与混凝土温差。冷却水与混凝土之间的温差一般按小于 20℃控制，通常配备 8~10℃和 14~16℃两套水温供应系统以适应不同控温阶段需求。白鹤滩拱坝的研究提出了反直觉的优化策略：将一期冷却进口水温从传统的

10℃提升到 14℃、通水流量从 36m³/d 加大到 72m³/d，在冷却效果一致的前提下，更有效地控制了水管壁附近混凝土的拉应力。该研究同时揭示，距水管壁 0.4m 处混凝土的最小安全系数仅 1.31，提示两层水管之间的应力并不能代表整个坝体的拉应力状态。工程实践中还创新性地引入每日 2 次换向机制，以均衡进水侧与出水侧的冷却效率，降低顺水流方向的温度梯度。

3.4 表面保温与养护

表面保温是控制内外温差、防止表面裂缝的重要辅助措施。保温层应具备良好的隔热性能与一定的蓄热能力，能够减缓表层混凝土的温度散失速率，使内外温差维持在安全范围。智能通水与双层柔性保温协同方式可将最大内外温差由 26.3℃压缩至 14.2℃。保温时机同样关键：拆除保温层的时机不当可能导致“冷击”效应，使表面混凝土骤然降温而产生裂缝。当混凝土表面温度与环境最大温差小于 20℃时，方可全部拆除保温层。养护期间应保持混凝土表面湿润，采用塑料薄膜、土工布、阻燃保温板等材料进行保温保湿养护，养护时间宜不少于 14 天。

4 智能温控与动态反馈技术

4.1 温度监测与数据采集

温度监测是温控决策的信息基础。传统监测手段以振弦式温度计和热电偶为主，测点布设需兼顾内部最高温度区、表面温差区及基础约束区。分布式光纤测温技术的引入提升了温度场监测的空间分辨率与连续性[4]。智能监测系统中，单块布设温度节点可达 50 个，分层布点，采样间隔 60 秒并进行滑动平均处理。大连新机场跨海通道工程在承台中心线关键区域布设 18 个高精度测温传感器，形成全域温度感知网络，传感器实时采集浇筑全过程的温度数据，如同嵌入混凝土的“神经末梢”。温度数据通过物联网传输至监控平台，实现实时采集与可视化展示。

4.2 智能通水与闭环控制

智能通水冷却的核心在于根据实时监测的温度与应力状态，动态调整冷却水流量、温度与通水时间。传统通水方案多依据经验制定固定参数，难以适应施工过程中边界条件的动态变化。智能控制系统通过建立温度预测模型与优化算法，实现冷却参数的自动寻优。特高拱坝通水冷却管网智能联控的原型研究系统分析了冷却水温、流量、流向等参数满足换热防裂的适应条件，提出了冷却水需求的确定方法，定义了供水保证率的量化评价指标。在制冷容量满足需求的前提下，流量供应主要受供水压力支配，供水水温沿程变化主要受外界气温与管道保温影响。

4.3 约束度动态反馈与“材料-工艺-调控”协同

近年来的研究趋势是将约束度指标由静态参数升级为动态反馈变量，构建“监测—反演—调控”的闭环控制体系。约束度反映了混凝土当前承受的约束程度，其数值可根据实时反演结果动态调整冷却水流量与层间间歇时间，使裂缝控制由经验驱动转向数据驱动。在此基础上，抗裂型配合比设计、智能通水控温、双层柔性保温及薄层浇筑工艺四项技术的有机整合，形成了“材料—工艺—调控”三位一体的综合控制策略。实践表明，这一协同体系可使裂缝发生率由 12.5%降至 0.8%，实测最大应力安全系数明显提升。

结束语

大体积水工混凝土温控防裂是一项涉及材料科学、结构力学与施工技术的系统工程。温度裂缝的防控需从源头减少水化热释放、从过程控制温度梯度发展、从末端强化表面保护，形成全链条的技术闭环。当前，低热胶凝材料体系与温升抑制剂的成熟应用为温控奠定了基础，通水冷却的精细化调控与智能换向技术积累了丰富经验，而基于约束度动态反馈的智能监测系统正在推动温控决策从经验模式向数据模式转型。未来，随着数字孪生、多源感知与深度学习技术的深度融合，大体积混凝土温控防裂有望实现从被动调控向主动预测的跨越，为水工结构的长寿命安全服役提供更为坚实的技术保障。

参考文献

[1] 李庆斌, 姚淇耀, 胡昱, 等. 现代运河大体积混凝土温控技术发展现状与展望 [J]. 前瞻科技,2025,4(3):1-12.

[2] 马晓宝. 大体积承台混凝土施工与温控技术的研究与应用 [J]. 广东建材,2026(9):160-164.

[3] 大体积墩台分层浇筑设计及温度裂缝控制验算 [J]. 工程设计,2024.

[4] 沈科钟. 水利水电大体积混凝土裂缝防控研究 [J]. 城市道桥与防洪,2026(8):339-342.