

高坝大体积混凝土温控防裂施工技术研究

李梅洁 杨泽许 杨润飞

浙江省第一水电建设集团股份有限公司 浙江 杭州 471900

摘要:高坝工程作为国家重大水利基础设施,其安全性和耐久性直接关系到国计民生与生态安全。大体积混凝土因其水化热集中、内外温差巨大,在施工期极易产生温度裂缝,严重威胁结构的整体性、抗渗性及长期服役性能。本文系统阐述了高坝大体积混凝土温度裂缝的形成机理与主要影响因素,深入剖析了温度应力的发展规律,并在此基础上,构建了一套涵盖材料优选、配合比优化、智能拌合与运输、精细化浇筑、全过程温控冷却、表面保温保湿及智能监测反馈的“全链条、一体化”温控防裂技术体系。通过理论分析与工程实践相结合,论证了该技术体系的有效性与先进性,旨在为未来超高、特高拱坝及重力坝的建设提供可靠的技术支撑与理论参考。

关键词:高坝;大体积混凝土;温度裂缝;温控防裂;水化热;智能监测

引言

随着我国“西电东送”、“水资源优化配置”等国家战略的深入推进,一批世界级的高坝大库工程相继规划与建设。白鹤滩、乌东德等300米级特高拱坝的成功建成,标志着我国在高坝建设领域已处于世界领先地位。然而,高坝工程的核心——大体积混凝土结构,在其施工过程中面临着严峻的温控防裂挑战。大体积混凝土最显著的特征是其巨大的几何尺寸,这导致了内部水泥水化反应产生的热量难以有效散发,从而在结构内部形成高温核心区。与此同时,混凝土表面则直接暴露于环境之中,热量散失迅速,由此在混凝土内部形成了显著的温度梯度。这种不均匀的温度场会诱发复杂的温度应力场。当由温差引起的拉应力超过混凝土在相应龄期的抗拉强度极限时,便会在结构内部或表面产生裂缝。这些裂缝不仅破坏了混凝土结构的整体性,更会成为水、侵蚀性介质侵入的通道,加速钢筋锈蚀和混凝土劣化,严重削弱大坝的承载能力、抗渗能力和耐久性,对工程安全构成潜在威胁。因此,如何科学、精准、高效地控制大体积混凝土的温度历程,抑制有害裂缝的产生,已成为高坝建设中的核心技术难题。传统的温控措施多侧重于单一环节,缺乏系统性和前瞻性。

1 高坝大体积混凝土温度裂缝成因与影响因素分析

要有效防治温度裂缝,必须首先深刻理解其形成机理及主导影响因素。

1.1 温度裂缝的形成机理

高坝大体积混凝土的温度变化过程通常可分为三个阶段。首先是升温期,混凝土浇筑后,水泥开始剧烈水化,释放大量的水化热。由于结构体形巨大,内部热量积聚,温度迅速攀升,可达50~70℃甚至更高。此阶段,混

凝土尚处于塑性或初凝状态,弹性模量低,徐变效应显著,能够有效松弛大部分由温升引起的压应力,故一般不会开裂。随后进入降温期,这是裂缝产生的关键阶段。随着水化反应逐渐平缓,内部热量开始向外界环境(空气、基础、老混凝土)传导和散发,混凝土整体温度开始下降^[1]。此过程漫长,可能持续数月乃至数年。在此期间,混凝土的弹性模量迅速增长,而徐变效应逐渐减弱。当混凝土因降温收缩受到外部(如基岩约束)或内部(不同部位温差)约束时,会产生拉应力。若该拉应力超过混凝土当时的抗拉强度,则产生贯穿性或深层裂缝。最后是稳定期,混凝土温度最终趋近于环境年平均气温,进入一个相对稳定的长期运行状态。此阶段的裂缝主要是由环境温度的周期性年变化(年温差)引起的,通常表现为表面浅层裂缝。

1.2 主要影响因素

温度裂缝的产生与发展受多重因素耦合作用。从材料角度看,高标号硅酸盐水泥因其C3A和C3S含量高,水化热总量和放热速率快,是温升的主要来源,因此降低单位胶凝材料用量,特别是水泥用量,是控温的根本。而粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料能有效替代部分水泥,不仅降低水化热总量,还能改善混凝土的后期性能和耐久性。骨料的导热系数、比热容及级配也直接影响混凝土的热学性能和绝热温升,优质的骨料可以减少水泥浆体用量,从而间接降低水化热。从结构与边界条件来看,结构越厚大,散热越困难,内部温峰越高,内外温差越大。大坝底部与坚硬基岩紧密结合,基岩对混凝土的强约束是产生基础贯穿裂缝的主要原因,而新浇筑仓面与已硬化的老混凝土之间存在的弹性模量和温度差异,也会形成相互约束,易在层面附近产生裂缝。施工与环境因素同样

至关重要,入仓温度是决定最高温升的起点,夏季高温季节浇筑会显著增加温控难度。通水冷却的时机、流量、水温及历时直接影响降温速率和最终温度。寒潮、大风等恶劣天气会加剧混凝土表面的热量散失和水分蒸发,增大内外温差和干缩,诱发表面裂缝。此外,合理的分缝分块虽然可以有效释放温度应力,但也会增加施工缝处理的复杂性,需要在设计中综合权衡。

2 高坝大体积混凝土温控防裂技术体系

针对上述成因与影响因素,现代高坝建设已发展出一套贯穿“材料-生产-施工-运维”全生命周期的温控防裂技术体系。

2.1 源头控制:低热、高强、高耐久混凝土材料研发与应用

从材料源头降低水化热是治本之策。近年来,中热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥因其C3A和C3S含量低,水化热总量和放热速率显著低于普通硅酸盐水泥,已在乌东德、白鹤滩等世界级工程中得到大规模应用,成功将混凝土绝热温升控制在25℃以内,为后续温控奠定了坚实基础。在此基础上,采用“粉煤灰+矿粉”或“粉煤灰+石灰石粉”等多元复合掺合料技术,不仅能大幅替代水泥(胶材替代率可达40%-60%),还能优化颗粒级配,提高混凝土密实度和后期强度,改善工作性。同时,聚羧酸系高性能减水剂的应用可实现高减水率(>25%),在保证工作性的前提下大幅降低水胶比和用水量,从而减少水泥用量^[2]。引气剂的引入则能形成微小、稳定的气泡,有效提高混凝土的抗冻融和抗裂性能,共同构成了低热、高强、高耐久的混凝土材料体系。

2.2 过程优化:精细化配合比设计与智能拌合

配合比设计的理念已发生根本转变,不再仅满足强度和耐久性要求,而是将“绝热温升”、“自生体积变形”、“极限拉伸值”等温控关键参数纳入核心设计指标。通过正交试验、数值模拟等手段,工程师们致力于在强度、耐久性与低热、高抗裂性之间寻求最优平衡点。为确保这一优化配合比在生产中得到精确执行,智能拌合系统应运而生。该系统集成了原材料自动称量、含水率在线检测、配合比动态调整、生产数据云端存储等功能。尤为关键的是,它能根据实时气象数据(如骨料温度)自动计算并调整冰屑或冷水的掺量,确保出机口温度精确可控,为后续的温控施工创造了极为有利的初始条件。

2.3 施工保障:全流程温控与精细化浇筑

温控措施贯穿于混凝土从出厂到成型的全过程。在高温季节,对骨料进行风冷、水冷或液氮预冷,并在拌合时加入片冰或制冷水,严格控制混凝土出机口温度(通

常要求 $\leq 7^{\circ}\text{C}$)。运输过程中,罐车加装保温隔热层,以最大限度减少运输途中的温度回升^[3]。到达仓面后,采用喷雾降温系统维持仓面小气候,防止混凝土在等待浇筑时因水分蒸发和太阳辐射而导致温度升高和工作性损失。浇筑过程中,合理规划浇筑顺序和分层厚度(通常1.5m-3.0m),避免出现因间隔时间过长而形成的“冷缝”。使用平仓振捣一体机等先进设备,确保混凝土均匀密实,减少内部缺陷。浇筑完成后,立即覆盖保温被(如聚苯乙烯泡沫板、土工布等)和保湿材料(如湿麻袋、土工膜),尤其是在夜间或预报有寒潮时,有效减小内外温差,防止早期塑性收缩和表面裂缝的产生。

2.4 核心手段:全过程智能通水冷却技术

通水冷却是高坝温控的核心和灵魂,其目标是精确调控混凝土的温度时空分布。在混凝土内部预埋高密度聚乙烯(HDPE)或硬质塑料冷却水管,形成网格状冷却回路,管距、层距均依据详尽的仿真计算确定,以确保冷却效果均匀。现代高坝普遍采用四阶段智能通水策略:在混凝土初凝后即开始通低温水(如8-12℃)进行初期冷却,以快速带走部分水化热,削减内部温峰;待温峰过后,通自然水或稍加冷却的水进行中期冷却,将混凝土温度缓慢、平稳地降至预定的接缝灌浆温度;在接缝灌浆前,进行最终的深度后期冷却,使坝体温度进一步降低至封拱温度;而在寒冷地区冬季,则可通循环热水进行反向加热,防止混凝土因环境低温而产生过大拉应力^[4]。这一系列复杂操作的精准执行,依赖于智能通水控制系统。该系统由分布式温度传感器、流量/水温传感器、电动调节阀、中央控制单元和云平台组成,基于有限元仿真预测的温度场,能自动、实时地调节各冷却回路的通水流量和水温,实现“按需供冷”,将混凝土任意点的温度精准控制在预设的安全包络线内,彻底改变了传统人工经验式通水的粗放模式。

2.5 长效防护:表面长效保温与特殊气候应对

对于高海拔、高寒地区的高坝,施工期的温控只是第一步,还需考虑长期运行期的温度稳定性。为此,需在大坝上游面、下游面甚至顶部铺设永久性 or 半永久性的保温层(如XPS挤塑板、喷涂聚氨酯等),以隔绝外界气温年变化对坝体的影响,防止运行期因年温差循环而产生新的温度裂缝。此外,针对寒潮、大风等极端天气,必须制定专项应急预案。例如,在气象部门预报有强寒潮来袭时,可提前加大通水流量进行预降温,或在混凝土表面覆盖双层甚至多层保温被,最大限度地缓冲温度骤变带来的冲击,确保大坝在任何气候条件下都能安然无恙。

3 工程应用与效果验证——以白鹤滩特高拱坝为例

白鹤滩水电站大坝作为300米级混凝土双曲拱坝，其建设代表了当今世界高坝工程技术的巅峰，同时也面临着前所未有的温控防裂挑战。为确保这一“大国重器”的安全与耐久，工程团队实施了一套系统而严密的综合温控防裂技术体系，并取得了卓越成效。

3.1 综合温控防裂技术体系的集成应用

面对高达289米的坝体和约800万立方米的混凝土浇筑量，白鹤滩工程从材料源头到施工全过程进行了精心设计与部署。在材料层面，全坝史无前例地大规模采用低热硅酸盐水泥，并将粉煤灰掺量提升至45%，从根本上大幅削减了混凝土的水化热总量。在施工过程控制上，建立了覆盖全链条的智能温控系统。该系统以全球规模最大的智能通水冷却网络为核心，预埋了上千米分布式光纤和数千个各类传感器，能够对近万个独立冷却回路进行实时、精准的调控。从骨料预冷、智能拌合楼动态调整出机口温度，到仓面喷雾保湿降温，再到浇筑后立即覆盖保温被，每一环节都紧密衔接，形成了一个无缝的温控闭环，确保了混凝土从生产到成型的每一个阶段都处于受控状态。

3.2 温控成效与工程价值

这套高度集成的“全链条、一体化”温控防裂技术体系在白鹤滩工程中展现出强大的威力。实践结果表明，大坝混凝土的最高内部温度得到了有效抑制，结构内部与表面的温差始终被严格控制在20℃的设计安全限值之内。尤为关键的是，整个坝体在施工期未发现任何危害性的贯穿性或深层温度裂缝，即便是表面裂缝的数量和宽度也远优于国内外同类工程的平均水平。这一成就不仅直接保障了大坝结构的整体性、抗渗性和长期服役的

耐久性，更为电站未来的安全、稳定、高效运行奠定了不可动摇的基石。白鹤滩的成功，不仅是单一技术的胜利，更是系统性、智能化温控理念的完美实践，为全球未来超高拱坝的建设树立了新的标杆，充分彰显了我国在该领域的技术引领地位。

4 结语

高坝大体积混凝土温控防裂是复杂系统工程，单一孤立技术措施难满足现代超高、特高拱坝严苛温控要求。需采取“预防为主、全程控制、精细管理、智能反馈”综合策略，构建全链条技术体系，从源头用低热水泥等材料，过程智能拌合、精细浇筑，核心依托智能通水冷却系统，辅以表面保温和极端天气应对措施，有效控制混凝土温度历程与应力，实现“无裂缝”或“无害裂缝”目标。展望未来，该技术将向智能化、绿色化、前瞻化发展，结合BIM、IoT和AI构建“数字孪生”平台，实现全生命周期智能管控与风险预警。同时，研发新型胶凝材料、提高工业固废利用率以降低碳足迹也是重要方向。总之，随着科技进步与工程经验积累，我国高坝大体积混凝土温控防裂技术将持续领先，筑牢国家水安全和能源安全防线。

参考文献

- [1]刘德平.高坝大体积混凝土施工温控技术优化及裂缝防控机制研究[J].水上安全,2025,(23):170-172.
- [2]杨修.大体积混凝土在大坝施工中的温控与防裂技术研究[J].中国水能及电气化,2025,(02):19-23+28.
- [3]李柯.重力坝大体积混凝土温控防裂施工技术研究[J].水泥,2025,(07):140-142.
- [4]姜功华.水库主坝大体积混凝土防裂温控方案及施工效果分析[J].江西建材,2025,(04):113-115+122.