

混凝土坝温控防裂技术进展与工程实践

卢韦华 韦增顺 韦敬龙

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530000

摘要: 混凝土坝作为重要的水利枢纽工程,在防洪、发电、灌溉、供水等方面发挥着不可替代的作用。然而,大体积混凝土在硬化过程中因水化热积聚导致内部温度急剧升高,随后冷却收缩,极易在结构内部产生温度应力,当该应力超过混凝土的抗拉强度时,便引发温度裂缝。裂缝不仅影响坝体的整体性和耐久性,还可能危及工程安全。因此,温控防裂一直是混凝土坝建设中的核心技术难题。本文系统梳理了混凝土坝温控防裂的基本原理,回顾了传统温控措施的发展历程,并重点综述了近年来在材料、结构、施工及智能监控等领域的关键技术进展。结合溪洛渡、白鹤滩等世界级高坝工程的实践案例,深入分析了现代温控防裂技术体系的集成应用效果。最后,对温控防裂技术的未来发展趋势进行了展望,旨在为高坝大库建设提供理论参考与工程指导。

关键词: 混凝土坝; 温控防裂; 水化热; 温度应力; 智能监控; 工程实践

引言

我国经济社会快速发展,“双碳”战略推进,水电作为清洁可再生能源地位重要。为满足能源与水资源调控需求,我国建成一批300米级超高混凝土坝,如锦屏一级等。这些工程规模大、技术复杂,对混凝土坝安全性、耐久性挑战巨大。大体积混凝土浇筑后,水泥水化放热,因导热差,内部升温快,与表面形成温差,降温时收缩受约束产生拉应力,超过极限便产生裂缝,削弱坝体性能,甚至引发结构失稳。自20世纪50年代起,国内外学者持续研究混凝土坝温控防裂问题,技术体系从“降温为主”发展到“全过程、多尺度、智能化”。本文旨在总结其发展脉络,阐述近年创新成果,结合工程实践验证有效性,为高坝建设提供技术支撑。

1 混凝土坝温控防裂的基本原理

1.1 温度场与应力场耦合机理

混凝土坝的温度场演化是一个复杂的非稳态热传导过程,受材料热物理参数(导热系数、比热容、密度)、环境边界条件(气温、水温、太阳辐射、风速)及内部热源(水化热)共同影响^[1]。其控制方程可表示为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_h$$

其中, T 为温度, t 为时间, ρ 为密度, c 为比热容, k 为导热系数, Q_h 为单位体积水化热释放速率。

温度变化引起混凝土体积变形,若变形受到约束,则产生温度应力。对于大体积混凝土结构,其应力场需考虑徐变、自生体积变形(如自收缩、干缩)等非弹性效应。温度应力 σ_T

可近似表示为:

$$\sigma_T = E(t) \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_{eff}$$

其中, $E(t)$ 为龄期相关弹性模量, α_T 为线膨胀系数, ΔT_{eff} 为有效温差(考虑徐变松弛后的等效温差)。

裂缝判据通常采用应力比准则:当 $\sigma_T / f_t(t) \geq 1$ 时,裂缝发生, $f_t(t)$ 为混凝土龄期抗拉强度。

1.2 裂缝成因分类

在混凝土坝的各类裂缝中,温度裂缝因其成因明确、危害严重而成为温控防裂技术的主要防控对象。这类裂缝直接源于水化热温升及其后续冷却过程中的体积收缩受阻。相比之下,干缩裂缝主要发生在混凝土表层,由水分蒸发引起,通常深度较浅,虽影响外观和局部耐久性,但一般不危及结构整体安全。沉降裂缝则多与地基不均匀变形或施工期基础处理不当有关,属于结构性问题。此外,施工过程中若层间间隔时间过长,导致新旧混凝土结合不良,也可能形成冷缝,削弱层面抗剪能力。尽管上述裂缝类型在成因上各有侧重,但在实际工程中往往相互交织、共同作用。因此,现代温控防裂策略不仅聚焦于抑制温度应力,还需统筹考虑施工工艺、材料性能与环境适应性,构建多维度的综合防控体系。

2 传统温控防裂技术体系

传统温控防裂技术体系是在长期工程实践中逐步形成的,其核心思路是“源头降温、过程控温、末端保温”。

2.1 材料层面

在材料层面,工程界普遍采用中热硅酸盐水泥以降低单位胶凝材料的水化热释放量,并大量掺加粉煤灰、矿渣粉等工业副产品作为矿物掺合料。这些掺合料不仅能替代部分水泥,减少总水化热,还能改善混凝土的工作性能和后期耐久性^[2]。配合比设计上,强调在满足强度

和耐久性前提下,尽可能降低胶凝材料总量,并严格控制水胶比。

2.2 结构与施工层面

在结构与施工层面,分缝分块是最基础且有效的应力释放手段。通过将庞大的坝体划分为若干独立的浇筑仓块,显著缩短了结构的约束长度,从而降低了温度应力的累积效应。通水冷却是控制内部温升的关键措施,通常在混凝土浇筑前预埋蛇形冷却水管,待混凝土初凝后通入低温水进行循环冷却。这一过程分为一期冷却(浇筑后数天内,旨在削减最高温升)和二期冷却(接缝灌浆前,旨在形成设计要求的接缝温度)。与此同时,坝体表面覆盖保温材料(如聚乙烯泡沫板或专用保温被)是防止表面裂缝的重要屏障,其作用在于减缓表面散热速率,缩小内外温差。此外,合理安排浇筑时段,如优先选择低温季节或夜间施工,也是利用自然条件辅助控温的有效策略。

2.3 监测与反馈

在监测与反馈方面,传统做法是在关键部位埋设温度计、应变计和无应力计等传感器,定期采集数据,人工分析温度与应力发展趋势,并据此调整通水流量或保温措施。尽管这套体系在中小型混凝土坝建设中取得了良好成效,但在面对300米级超高拱坝时,其被动响应、调控精度不足、依赖经验等局限性日益凸显,难以满足“零贯穿裂缝”的严苛质量目标,亟需向智能化、精细化方向升级。

3 近年温控防裂关键技术进展

3.1 新型低热胶凝材料体系

近年来,我国在胶凝材料领域取得突破性进展,自主研发的低热硅酸盐水泥(LHC)成功实现了工程化应用。该水泥通过调整熟料矿物组成,大幅降低了早期水化放热速率和总量,其7天和28天水化热分别控制在230kJ/kg和260kJ/kg以下,显著优于传统的中热水泥。更为重要的是,LHC在降低水化热的同时,并未牺牲后期强度发展,反而因其微观结构更致密而展现出更优的抗裂性能。在白鹤滩水电站这一世界级工程中,全坝首次大规模采用LHC,并配合高达40%至55%的粉煤灰掺量,构建了一套“低热、高强、高耐久”的混凝土配合比体系。这种材料层面的根本性革新,从源头上大幅削减了温升潜力,为实现“无裂缝”目标奠定了坚实基础。

3.2 全过程智能温控技术

全过程智能温控技术的兴起,标志着温控防裂从“经验驱动”迈向“数据驱动”与“模型驱动”。首先,在预测环节,研究者将传统的有限元热-力耦合模型

与机器学习算法(如长短期记忆网络LSTM)深度融合,构建了高精度的温度场预测模型。该模型能够实时融合气象预报、施工进度、材料批次参数等多源异构数据,提前7至15天精准预测各浇筑仓块的温度演变趋势,为前瞻性决策提供科学依据^[3]。其次,在执行环节,智能通水冷却系统取代了传统的人工调控模式。该系统为每个冷却回路配备独立的流量与水温控制单元,并基于埋设传感器的实时反馈,通过预设算法自动调节通水参数,实现“按需冷却”。这种变流量、变水温的精细化策略,既能有效控制最高温度,又能避免因降温过快而诱发二次裂缝。在白鹤滩工程中,该系统成功将坝体最高温度稳定控制在35℃以内,降温速率严格限制在1℃/天以下。此外,表面保温技术也实现了智能化升级,例如采用相变材料(PCM)制成的保温板,可在特定温度区间内吸收或释放潜热,自动缓冲外界气温波动对混凝土表面的影响。配合红外热成像无人机进行全域巡检,可动态评估保温效果,及时发现薄弱区域。

3.3 数字孪生与BIM集成

数字孪生技术的引入,为混凝土坝温控管理提供了全新的范式。通过将建筑信息模型(BIM)与海量现场监测数据深度融合,构建出一个与物理实体坝体实时同步的虚拟“数字孪生体”。在这个虚拟空间中,工程师不仅可以直观地查看任意时刻、任意位置的温度、应力状态,还能基于历史数据和预测模型,模拟不同温控策略下的结构响应,从而实现“预测-预警-决策-优化”的闭环管理。溪洛渡水电站是这一理念的先行者,其BIM平台集成了超过20万个传感器的数据流,实现了温控全过程的可视化、可追溯与可调控,极大提升了管理效率与决策科学性。

3.4 微裂缝自修复技术探索

尽管现代温控技术已能有效预防宏观裂缝,但对微米级微裂缝的容忍与修复正成为前沿研究方向。科研人员尝试在混凝土基体中预埋含有修复剂的微胶囊或特定的微生物菌剂。当微裂缝扩展至这些载体时,胶囊破裂或菌剂被激活,释放出的物质与环境中的水分、二氧化碳等反应,生成碳酸钙等沉淀物填充裂缝,从而部分恢复材料的抗渗性和力学完整性^[4]。虽然该技术目前仍处于实验室验证和小规模试点阶段,尚未在大型水坝中广泛应用,但它所蕴含的“韧性设计”思想——即从追求绝对无裂转向允许可控微裂并具备自愈能力——为未来混凝土坝的长期服役安全开辟了新的可能性。

4 重大工程实践案例分析

4.1 溪洛渡水电站(285.5m,双曲拱坝)

溪洛渡水电站位于金沙江下游的干热河谷地带,施工期环境极端,夏季气温常高达40℃以上,昼夜温差剧烈,给温控防裂带来了巨大挑战。面对这一难题,工程团队采取了一套综合性的温控方案。在材料上,选用了中热水泥并掺加45%的优质粉煤灰,有效抑制了水化热峰值。在施工中,全坝系统性地埋设了总长超过1200公里的冷却水管,并创新性地实施了“早冷、缓冷、长冷”的通水策略,即在混凝土初凝后尽早开始冷却,但控制降温速率,延长冷却周期,以兼顾温控效果与徐变应力松弛。同时,针对干热河谷的特殊气候,坝体表面全覆盖高性能保温被,并在高温时段辅以喷雾降温措施,最大限度地减小了表面热冲击。最终,该工程成功将坝体最高温度控制在38℃以内,经全面检测未发现任何深层温度裂缝,其卓越的建设质量赢得了“国际里程碑工程奖”的殊荣。

4.2 白鹤滩水电站(289m,双曲拱坝)

白鹤滩水电站代表了当前世界混凝土坝温控防裂技术的最高水平。其最核心的创新在于全球首次实现了全坝使用低热硅酸盐水泥,这不仅是材料应用的革命,更是温控理念的跃升。以此为基础,工程构建了一个高度集成的“智能温控云平台”。该平台以BIM模型为骨架,实时接入数万个温度、应变传感器的数据,并驱动智能通水系统全自动运行。整个冷却过程无需人工干预,系统能根据模型预测和实时反馈,自主优化每个回路的水温和流量,确保全坝温度场高度均匀。此外,项目还建立了“温度-应力-裂缝”风险预警模型,一旦监测数据偏离安全阈值,系统会立即发出预警并启动预案。截至2024年工程全面蓄水,白鹤滩大坝的监测数据显示,其内部温度与应力状态始终处于理想区间,真正实现了“零温度裂缝”的建设目标,树立了世界高坝建设的新标杆。

4.3 对比分析

表1 实践效果对比分析

| 项目 | 水泥类型 | 粉煤灰掺量 | 最高温度控制 | 通水方式 | 裂缝控制效果 |
|------|------|---------|--------|-------|--------|
| 传统工程 | 中热水泥 | 20%-30% | ≤ 40℃ | 人工调控 | 少量浅表裂缝 |
| 溪洛渡 | 中热水泥 | 45% | ≤ 38℃ | 半自动 | 无深层裂缝 |
| 白鹤滩 | 低热水泥 | 50% | ≤ 35℃ | 全自动智能 | 零温度裂缝 |

可见,材料革新与智能控制的深度融合是实现高坝“无裂”建设的关键。

5 未来发展趋势与挑战

未来,混凝土坝温控防裂技术将朝绿色化、智能化、韧性化发展。材料方面,重点研发更低水化热、低碳足迹的新型胶凝材料,契合“双碳”战略。技术上,5G、边缘计算和人工智能算法成熟,将推动温控系统实现无人化与自主决策,形成智能闭环。理论研究也将深入,建立多物理场全耦合精细化模型,提升对裂缝机理的认知。不过,挑战也不少。极端气候频发,考验温控系统的鲁棒性与适应性;超高层坝底部混凝土缓慢温升及与徐变的长期耦合效应,是待解科学难题。此外,智能系统面临数据安全、模型可靠性和运维成本等挑战,新型材料的长期性能及工程适用性也需长时间实践验证。

6 结语

混凝土坝温控防裂技术历经数十年发展,已从经验主导走向科学化、系统化、智能化。以低热水泥为代表

的材料创新,以智能通水、数字孪生为核心的全过程温控体系,显著提升了高坝混凝土的抗裂性能。溪洛渡、白鹤滩等世界级工程的成功实践,不仅验证了现代温控技术的有效性,更树立了“无裂缝大坝”的新标杆。未来,温控防裂技术将朝着绿色低碳、智能精准、韧性可靠的方向持续演进。通过多学科交叉融合与工程实践迭代,我国有望在超高混凝土坝建设领域继续保持国际领先地位,为全球水利水电工程提供“中国方案”。

参考文献

- [1]刘露.基于经济-质量双控的混凝土坝温控防裂优化方法研究[D].中国水利水电科学研究院,2024.
- [2]张集林.碾压混凝土坝夏季施工温控防裂问题探析[J].河南水利与南水北调,2024,53(05):90-92.
- [3]邢坦,胡文才,王振红.碾压混凝土坝陡坡坝段施工期温控防裂研究[J].人民黄河,2020,42(02):132-137.
- [4]张国新,刘毅,刘有志,等.高混凝土坝温控防裂研究进展[J].水利学报,2018,49(09):1068-1078.