

大坝碾压混凝土施工温度控制关键技术与实践

殷建

中铁资源集团中刚布桑加水电股份有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19046

[摘要] 碾压混凝土大坝以其施工速度快、综合造价低、整体性强等优势在水利水电工程建设中应用广泛。然而,由于碾压混凝土属于典型的大体积混凝土结构,其内部温度随水化热释放快速升高,而外界环境条件与施工节奏可能导致表层温度变化剧烈,易造成温度梯度过大诱发温度裂缝,从而影响结构安全性与长期稳定性。因此,施工温度控制成为碾压混凝土大坝建设的核心技术内容。本文围绕碾压混凝土施工温度变化规律、材料与施工组织预控技术、施工过程温度调控方法、降温与散热措施以及监测评估体系构建等方面展开系统研究。在分析不同影响因素作用机制的基础上,结合现代施工技术的发展趋势提出一套综合性温控关键技术体系。研究认为,从材料源头控制、施工组织优化、智能监测手段应用、冷却技术协同以及后期评估机制完善等方面综合发力,可显著提升大坝碾压混凝土温控效果,减少温度裂缝风险,为大坝工程安全建设提供重要技术支撑。

[关键词] 大坝工程; 碾压混凝土; 温度控制; 冷却技术; 智能监测

中图分类号: TV42+1.1 文献标识码: A

Key Technologies and Practices for Temperature Control in Roller-Compacted Concrete Construction of Dams

Jian Yin

China Railway Resources Group China-Congo Busanga Hydropower Co., Ltd.

[Abstract] Roller-compacted concrete (RCC) dams are widely used in water conservancy and hydropower projects due to their rapid construction speed, low overall cost, and strong structural integrity. However, as RCC constitutes a typical mass concrete structure, its internal temperature rises rapidly with the release of hydration heat, while external environmental conditions and construction sequencing may cause sharp temperature fluctuations near the surface. These factors can easily generate excessive temperature gradients and induce thermal cracking, thereby compromising structural safety and long-term stability. Therefore, construction temperature control has become a core technical issue in RCC dam construction. This study systematically investigates the temperature variation patterns of RCC during construction, preventive control technologies related to materials and construction organization, temperature regulation methods in the construction process, cooling and heat-dissipation measures, and the establishment of monitoring and evaluation systems. On the basis of analyzing the mechanisms of key influencing factors, this paper proposes an integrated set of critical temperature-control technologies in line with modern construction trends. The results indicate that comprehensive efforts—including source control of materials, optimization of construction organization, application of intelligent monitoring approaches, coordination of cooling technologies, and improvement of post-construction evaluation mechanisms—can significantly enhance temperature-control performance, reduce the risk of thermal cracking, and provide essential technical support for the safe construction of RCC dam projects.

[Key words] dam engineering; roller-compacted concrete; temperature control; cooling technology; intelligent monitoring

引言

碾压混凝土大坝成为近年来水利水电工程的主要结构形式

之一,其核心优势体现在施工速度快、材料成本低、机械化程度高、整体结构稳定性好等方面。然而,该结构在施工过程中普遍

面临温度控制难题。由于大体积混凝土内部水化热释放迅速、散热能力有限,在高温、低风速或施工节奏快速堆填等条件下,内部温度快速升高,易形成较大的温度梯度。一旦内部温度过高或内外温差过大,将引发温度开裂,影响结构完整性,甚至降低大坝服役寿命。因此,温控技术成为大坝建设中必须重点关注的工程问题。目前,大坝碾压混凝土温控技术的发展已从传统经验式方法逐步走向量化、精细化、智能化。材料掺合技术、冷却系统布置、覆盖保温材料改进以及信息化监测平台均不断成熟。然而,在复杂环境条件下温度控制仍存在诸多挑战,如温控措施适应性不足、施工组织与降温方法协调不够、监控数据分析能力有限等。因此,构建科学、系统、可操作性强的温控技术体系具有重要现实意义。本文旨在探索影响碾压混凝土温度的关键因素,在材料选择、施工管理、降温技术应用及监测评估体系等方面提出优化策略,以期提升大坝工程温控水平,确保结构安全。

1 碾压混凝土温度变化规律及影响因素分析

1.1 碾压混凝土水化热导致的内部温升规律

碾压混凝土内部温度变化的最根本驱动力在于水化反应所释放的热量。水泥在与水接触后,在初期数小时内快速发生水化反应,并释放大量热量,使得内部温度呈现明显上升趋势。当大坝施工采用快速分层、连续碾压的方式时,不同层次混凝土的水化热会相互叠加,使坝体内部热量难以扩散,从而进一步增加最高温度。有研究显示,当单层厚度较大或施工间隔过短时,内部温升速率显著高于表层散热速率,温度峰值不仅更高,出现时间也更早。此外,由于碾压混凝土采用较低水胶比,结构密实性较高,其导热性能较常态混凝土更强,温度扩散速度有限,导致内部温度在较长时间内处于高位,这增加了温度梯度累积的可能性。

1.2 环境气温、湿度与施工季节的综合作用

大坝工程施工现场的自然环境条件对碾压混凝土的散热效果有重要影响。在高温季节,特别是气温高于 30°C 时,混凝土表层的热量无法有效向周围环境散发,表面温度容易迅速升高,导致内外温差扩大。而在低温或强风条件下,表层温度下降过快,造成与内部温度不匹配,使表层收缩速率明显高于内部,易产生表面拉应力裂缝。此外,湿度条件也显著影响混凝土散热。相对湿度低时,表层水分蒸发加快,使表层降温速度增加,而内部温度下降较缓,使温差进一步扩大。

1.3 材料特性与施工参数对温度场形成的影响

材料因素是影响温度变化的重要变量,包括水泥品种、水泥用量、掺合料比例和骨料温度等。采用普通硅酸盐水泥会导致水化热更大,加速温升过程,而采用矿渣水泥或粉煤灰水泥则可明显降低放热速度和峰值温度。在掺合料较高的配比条件下,混凝土内部温度变化更加平稳,有利于温度控制。骨料温度、含水率等也直接影响混合料初温。大坝工程碾压混凝土施工参数方面,如分层厚度较大、碾压密实度不足或层间施工间隔过短均会影响混凝土内部热量扩散,使温升过程更不均匀。

2 施工前温度控制的材料与组织预控措施

2.1 低水化热材料的科学选择与掺合料优化

大坝工程碾压混凝土施工前通过材料选择降低水化热是温控体系的源头控制环节。低水化热水泥如矿渣水泥、粉煤灰水泥不仅能够显著降低早期水化热,还能改善混凝土后期强度发展,使温度效应与力学性能协同优化。掺合料方面,粉煤灰、矿渣粉的加入一方面减少了水泥用量,降低水化热;另一方面可以通过其火山灰反应延缓放热速率,使温度变化更加均匀。此外,通过掺加减缩剂等外加剂可进一步降低温度应力。材料结构的合理配置是确保混凝土在温控状态下仍具备良好力学性能的重要前提。

2.2 混合料预冷处理与入仓温度控制

混合料初温的控制直接影响坝体温度峰值。采取预冷措施可明显降低混凝土初温,如通过骨料喷雾冷却、设置遮阳设施、使用冷却水或冰水搅拌使入仓温度降低。骨料温度管理尤其关键,因为骨料质量大、比热高,在混合料温度中占主导作用。通过降低骨料温度,可直接降低整体混合料温度约 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。运输过程也需注意温度变化,增加保温或防晒装置以防混合料在运输途中升温。合理控制入仓温度可以减少后期冷却系统的负担,并提高整体温控效率。

2.3 施工组织方案中的温控规划与工序协调

大坝工程碾压混凝土施工组织预控措施包括施工时段选择、分层厚度确定、施工节奏安排、冷却系统预布置等内容。高温天气应避免在午间施工,选择清晨、傍晚或夜间施工可显著降低混合料入仓温度和表层升温速率。合理设置分层厚度和间隔时间,使热量有足够时间散发,避免累积。同时,提前制定温控计划,包括冷却管布置图、监测点布置方案、温控人员安排和应急预案等。温控计划需结合气象预测数据和施工进度动态调整,使温度管理与施工效率保持平衡。

3 施工过程中的关键温度控制技术

3.1 分层厚度合理控制与层间温差协调

大坝工程碾压混凝土采用分层施工方式,而层厚直接关系散热效果。厚层施工易造成内部热量积聚,因此应根据结构部位和气候条件确定不同的分层厚度。在热环境较恶劣的施工区域,可采用较薄分层厚度促进热量散发。此外,层间温差是影响结构完整性的重要变量。层间温差应控制在合理范围,以减少因上下层温度差异引发的不均匀变形。通过调整施工节奏、增加散热时间,可有效避免层间温差过大。监测点应布设在不同高度以掌握温度随层施工的变化特征,动态指导施工。

3.2 表层覆盖材料的保温与隔热效果优化

大坝工程碾压混凝土施工过程中的覆盖处理是温控体系的重要组成部分。在强日照条件下,通过覆盖反射膜减少表层吸热,可以降低表层温度上升速度。在低温环境中,采用保温被、保温棉等材料保持表层温度,减少过快降温。覆盖材料应具备较高反射性能、耐久性和施工适用性,同时避免阻碍混凝土散热。覆盖应结合天气情况和温度监测数据及时调整覆盖范围和持续时间,以实现最佳温控效果。

3.3 施工温度监测系统与实时调控机制

大坝工程碾压混凝土施工过程温度监测需要布设多层监控系统,包括内部埋入式传感器、表面测温点和环境气温记录设备。监测数据需实时传输至控制平台,通过软件进行分析。对超过预警值的温度变化应及时采取调节措施,如改变施工节奏、加厚覆盖材料、延长散热时间或启动冷却系统。温度监测系统需要具备快速响应能力,并能根据历史数据建立温度变化趋势模型,为未来施工做出预测。通过实时监测、动态分析和调控措施的闭环管理,可确保施工过程处于可控状态。

4 混凝土降温与散热技术的系统协同应用

4.1 自然散热条件优化与施工环境管理

自然散热依赖气温、风速、湿度等因素。通过改善施工现场通风条件,如避免挡风设施阻碍空气流动、合理布置施工道路减少遮挡,可以提高自然散热能力。在气候允许的情况下利用自然风进行散热,是低成本且效果稳定的温控手段。然而,自然散热存在不可控性,需要与人工降温措施协同配合,尤其大坝工程碾压混凝土施工是在夏季高温或湿度较大的条件下,自然散热的效果有限,因此必须通过多种散热技术组合提高温控效率。

4.2 材料预冷与冷却水技术的协同使用

预冷技术通过降低混凝土初始温度减少后期温控压力。采用冰水搅拌的方式可在短时间内显著降低混合料温度,特别适用于高温环境下的大坝施工。同时,拌和站的整体降温也可采用喷雾降温、骨料冷却仓等方式。冷却水系统方面,内部冷却管可实现持续降温。循环冷却水通过管道吸收混凝土内部水化热,将热量带至外部散发,起到显著降温作用。冷却水温度、流速、运行时间和冷却管布置密度均需根据结构温度场进行优化设计,确保降温过程稳定且均匀。

4.3 冷却管布局与强制冷却系统运行优化

冷却管的布置是内部降温系统的关键技术点。大坝工程碾压混凝土施工一般采用环状或网状布置方式,以确保结构内部温度分布均匀。管间距过大可能造成局部散热不足,而管径过大或流速过快可能导致局部过冷,产生反向温差应力。因此需根据有限元分析结果确定最佳布置参数。冷却系统运行期间,需根据实时温度信息调整冷却水流量与温度,实现温度变化的精细化控制。运行稳定性对温控效果至关重要,包括防止管道堵塞、泄漏、流速波动等风险。

5 温控效果监测、评估与技术优化方向

5.1 温度监测网络建设与数据分析模型

大坝工程碾压混凝土温控体系需要依托完整的数据采集和分析平台。通过布设温度传感器、数据采集器和无线传输系统,构建多层次温度监测网络,可实现对混凝土内部温度变化的连续监测。数据平台应具备温度曲线绘制、峰值预测、温差分析等功能。通过分析温度历史数据,可建立统计分析模型,预测未

来温度变化,为施工调整提供依据。温度数据的精度与时效性决定温控决策的科学性。

5.2 温控效果评估体系的构建

温控效果评估需要综合多个指标,包括最高温度是否符合设计要求、温度梯度是否在安全范围内、层间温差是否过大、水化热峰值出现时间是否合理等。通过对这些指标进行分析,可以判断温控措施的有效性。此外,在大坝工程碾压混凝土施工后期还应通过钻芯试验、外观检查等方式评估温控效果是否达到了结构安全标准。评估体系需与监测系统结合,形成可记录、可分析、可追溯的温控管理链条。

5.3 温控技术未来的智能化与系统化发展方向

随着数字技术的发展,混凝土温控技术正在向智能化方向快速进步。例如,智能监测系统可通过传感器与云平台对坝体温度进行实时分析;基于大数据的温控预测模型可提前识别升温风险;BIM技术与物联网结合可实现温控过程可视化展示与模拟。在冷却系统方面,智能冷却控制技术可根据实时温度情况自动调整水流与温度,大幅提升温控效率。未来温控技术的发展将依赖多技术协同,包括人工智能、大数据、自动化设备等,使温控系统更具预见性和自适应能力,推动大坝建设向更安全、更节能、更高效方向发展。

6 结论

碾压混凝土大坝施工温度控制是确保结构安全与长期稳定的关键技术内容。围绕材料预控、施工组织设计、降温技术应用和监测评估体系构建等环节形成的系统化温控技术体系,是减少温度裂缝、改善温度场分布、保障工程质量的重要前提。本文从温度变化规律分析入手,通过提出施工前预控技术、施工过程温控措施、降温散热技术以及监测评估体系优化策略,构建了较为全面的温控技术框架。未来,随着智能监测、自适应冷却与数字化管理技术的应用,大坝碾压混凝土施工温控将更加科学与精细,有助于进一步提升工程建设水平。

[参考文献]

- [1]王国俊,李树森.大坝碾压混凝土施工温度控制研究[J].水力发电学报,2018,37(4):112-118.
- [2]刘志强,张德顺.大体积混凝土温度控制技术发展综述[J].工程建设,2019,50(6):55-60.
- [3]陈立波,李先庭.混凝土温度应力及裂缝控制关键技术研究[J].水利水电科技进展,2020,40(2):63-69.
- [4]黄鑫,赵鹏.碾压混凝土大坝温控技术与施工管理[J].水电能源科学,2021,39(5):122-126.
- [5]周明亮,刘强.大坝工程中冷却管路布设与温度控制优化研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(3):95-100.

作者简介:

殷建(1983--),男,汉族,湖北随州人,本科,工程师,论文方向(具体): (非洲)碾压混凝土大坝水电站施工。