

大体积混凝土在水电站重力坝施工中的温控措施

袁 野 李大健 邢 锋

南京市水务建设工程有限公司 江苏南京 210019

摘 要：在可再生能源迅猛发展的今天，水电站作为清洁能源的一种重要形式越来越扮演着重要角色。重力坝作为水电站施工过程中必不可少的一部分，重力坝结构是否安全稳定直接影响着水电站整体的运行性能。重力坝施工期大体积混凝土温度控制已成为关键技术，尤其浇筑时混凝土内水化热及环境因素均可引起温度急剧变化，这样不仅会对混凝土强度和耐久性造成影响，而且会导致裂缝出现，危及坝体结构安全。文章通过深入的研究与实践，旨在为大体积混凝土的施工提供可行的解决方案，确保重力坝的结构安全和长期稳定运行。

关键词：大体积混凝土；水电站；重力坝施工；温控措施

引言

近年来，随着水电项目规模的不断扩大，重力坝的混凝土体积越来越大，如何有效控制混凝土的温度成为了工程界面临的重要课题。混凝土在硬化过程中会产生水化热，导致其内部温度升高，形成热应力。而当温度变化幅度过大时，会引发温度裂缝，降低混凝土的使用寿命及其承载能力。因此，针对大体积混凝土的温控措施，研究人员和工程师们开展了大量的研究和实践。这些措施不仅包括合理的混凝土配合比设计、施工工艺的优化，还有冷却系统的引入及温度监测技术的应用等。

一、大体积混凝土的特点

（一）大体积混凝土的定义与应用

所谓大体积混凝土，就是施工时一次性浇注混凝土体积大，一般指大到几立方米混凝土体积的部件。这类混凝土因其本身的特点，常被用于大型工程项目，尤其是水坝，桥梁，高层建筑和隧道的施工。大体积混凝土之所以得到广泛应用，不仅仅是因为它承载能力强、耐久性好，更重要的是它对结构安全性和稳定性有着显著优点。但由于硬化时产生大量水化热可能造成混凝土内部温度急剧波动，该温度变化如果不能有效地控制则易诱发温度裂缝或者对混凝土力学性能造成影响。所以在进行大体积混凝土施工时科学合理地采取温控措施具有重要意义。对此，工程师往往从优化混凝土配合比，合理分配施工时间以及利用冷却系统对混凝土进行温度控制，从而保证混凝土强度与耐久性。与此同时，伴随着科学技术的进步，温度监测技术在大体积混凝土施工中的运用使其施工管理越来越细致。

（二）大体积混凝土的物理与化学性质

大体积混凝土的物理与化学性质是其在工程应用中表现出优越性能的基础。物理性质方面，大体积混凝土的密度通常在 $2,200 \text{ kg/m}^3$ 至 $2,500 \text{ kg/m}^3$ 之间，表现出良好的抗压强度，通常可达到 30 MPa 至 50 MPa ，甚至更高，这使其能够承受巨大的结构荷载。同时，由于体积较大，在水化过程中会产生显著的水化热，导致内部温度的变化。因此，控制混凝土的温度尤其重要。化学性质方面，混凝土的水胶比（通常在 0.4 至 0.6 之间）直接影响其强度和耐久性，适当的水胶比能够提高混凝土的整体性能。大体积混凝土中的水泥成分一般为硅酸盐水泥，结合矿物掺合料如粉煤灰或矿渣，可以改善其耐久性和抗裂性。此外，混凝土中的骨料粒径、级配及其质量也会对最终性能产生影响，一般建议最大骨料粒径不超过 20 mm ，以避免因温度变化而导致的裂缝。大体积混凝土的耐久性与抗渗性同样重要，通常通过加入外加剂（如减水剂）来降低孔隙率，进而提升其抗渗性能，有效防止水和化学物质的侵入。

（三）温度变化对混凝土性能的影响

温度变化是混凝土性能变化的关键因素，特别是大体积混凝土施工时尤为突出。混凝土在浇注过程中，内部水化反应产生水化热使混凝土内部温度急剧升高，这种温度变化可达摄氏 70 度或更高，并沿混凝土截面方向形成显著温差。若这种温差过大，就会使混凝土内形成热应力从而诱发裂缝或降低混凝土的抗拉强度。另外，当温度下降时，混凝土会发生收缩，如果这时收缩幅度结合了温度上升引起的膨胀，则易引起混凝土内部应力不平衡，从而影响其长期耐久性及其使用寿命。温度变化

会对混凝土强度及韧性产生影响，温度过快冷却或加热均会造成强度发展不充分，从而影响结构承载能力。对于服役时间较长的混凝土结构而言，温度在抗渗性、耐久性等方面也起到了至关重要的影响，温度起伏大时混凝土内部孔隙率有可能会增大，进而促进浸水、化学物质入侵等危险。所以合理地控制施工期温度的变化是保证混凝土性能稳定性的重点，需要采取合适的温控措施对混凝土内部温度进行有效地管理，降低温差可能给混凝土结构带来的负面影响。

二、水电站重力坝的结构特点

水电站重力坝属于靠自重来抵抗水压力作用的坝体，它的设计思想是利用重力作用把水流水平推力变为竖直向下压力来维持结构稳定安全。重力坝一般采用混凝土或者土石料建造，截面形状大多为三角形或者梯形，此种设计能有效地分散水流所产生的压力，使坝体面临水位的变化，仍能保持牢固和稳定。重力坝厚度通常在坝基处变大，并随高度增加而逐渐变小，该渐变结构既增加了与坝基接触面积和提高整体抗滑移能力，又可有效地抵抗水流冲击力。

坝体内部，重力坝一般都有若干排水孔及观察孔，以防渗漏及水压累积，这些排水系统能有效地降低坝体内部水位、缓解坝体浮力及侧向压力。另外，针对极端天气、地震及其他自然灾害，现代重力坝的设计也日益纳入防震、抗洪考虑。在抗震设计中，对重力坝进行合理应力分析及耐久性评估以保证重力坝震后仍能保持安全稳定状态。

重力坝施工过程比较复杂，必须对混凝土浇筑与维护进行准确控制，才能保证坝体强度与密实性。应用大体积混凝土使坝体强度提高，但也对温度控制提出挑战，所以需要在施工中采取有效温控措施，降低温差导致裂缝。另外，重力坝维修是一个长期任务，它包括对坝体裂缝、渗漏和基础沉降等进行定期检测，以保证坝体结构能够在使用周期中保持较好的安全性能。总之，水电站重力坝结构特点对它的安全运行起着重要的保证作用，而设计和维护策略的合理性则是保证这一重要基础设施的安全性和稳定性至关重要。

三、大体积混凝土的温控措施

（一）温度监测与控制系统

温度监测与控制系统对大体积混凝土的施工起着至关重要的作用，主要是对混凝土内、表面温度的变化进行实时监控，从而保证硬化后混凝土性能的稳定。系统一般包括温度传感器、数据采集单元、监控软件、报

警系统等。温度传感器设置于混凝土浇筑过程中各关键部位，特别是混凝土核心区域及近地表处，以及时得到真实温度数据。数据采集单元承担着对传感器采集数据的整理与存储工作，监控软件通过图形化界面显示实时温度变化曲线以辅助工程师与技术人员快速确定温度异常。

在温度控制上，该系统可以通过预警阈值的设定，自动发出警报，一旦混凝土的温度超出了设定的范围，本系统将及时的通知有关的人采取相应的措施。另外，该温度控制系统可结合冷却管道等冷却设施，依据实时温度数据对冷却水流量及温度进行自动调整，从而有效地减小混凝土内外侧温度差。该主动控制既能减小温度裂缝风险又能改善混凝土抗压强度及耐久性。在部分大型水电站工程中，有效的温度监测和控制系统已经成为保证施工质量和安全的重要途径，对保证大体积混凝土施工的顺利实施起到强有力的支撑作用。

（二）混凝土配合比的优化

优化混凝土配合比是提升大体积混凝土施工性能至关重要的一环，科学合理地进行配合比设计能够有效提高混凝土强度，耐久性和抗裂性等。优化时，水泥、骨料、水及外加剂等材料的选用及配比非常关键。水泥作为混凝土主要胶结材料，水泥掺量对混凝土强度有着直接影响，一般选用普通硅酸盐水泥达到国家标准或者参加矿物掺合料来改善混凝土抗压强度和抗渗性。骨料粒径大小与级配大小一样重要，粒径分布合理能充填孔隙，在减小水胶比的前提下减少水量，从而使混凝土密实性增强，强度提高。

水要按要求的工作性及强度合理地控制其掺量，过多会使混凝土强度下降，过少又会影响其施工操作性。选用外加剂时，一般采用减水剂与缓凝剂两种，减水剂能有效地减少水胶比、增加混凝土稠度与强度、缓凝剂能延长混凝土初凝时间、适用于高温季节大体积混凝土。另外，矿粉、粉煤灰及其他矿物掺合料的参加可提高混凝土长期强度与耐久性并减少水化热产生，进而有效地控制温度变化诱发裂缝风险。在混凝土配合比优化过程中，还要通过一系列试验验证才能保证最终配合比达到工程要求，使经济和性能达到最优平衡。通过对配合比进行精细优化，既可以保证大体积混凝土施工质量又可以有效地延长使用寿命，对工程安全起到了保证作用。

（三）施工工艺的调整

施工工艺调整对于保证大体积混凝土工程质量与安全至关重要，特别是水电站重力坝。根据大体积混凝土特性，采用合理施工工艺可以有效减缓因水化热生成而

引起的温度变化并减少裂缝风险。在浇筑阶段，施工团队需要事先拟定详细的施工方案，这包括混凝土浇筑的顺序、所需时间以及相关的工艺参数，以确保每个阶段的施工都能与整体工程的进度保持一致。施工前需要全面测试混凝土材料特性并根据天气条件及环境温度选择适宜浇筑时间。避免高温或者极端天气能有效地减少混凝土内水化热并维持温度变化较均匀。

在浇筑工艺中，一般建议采用分层浇筑，在施工过程中可以分层浇筑混凝土至一定厚度以降低各层水化热累积。同时利用振动器及其他装置辅助混凝土致密，保证其各个部位完全结合，降低空穴及裂缝出现的概率。每一层浇筑完成之后，都要进行足够的养护，特别要保证混凝土表面不因为失水出现龟裂现象，特别是温度较高或者干燥环境下，一般都要经常喷水或者对养护材料进行遮盖。

施工期对混凝土进行严格温度监测并时刻记录混凝土温度变化情况，一旦发现气温上升过快，要及时采取措施进行降温，例如调节冷却系统水流量或者加大通风力度等。另外，施工团队需要定期检查混凝土强度，以保证混凝土硬化后满足设计强度要求。通过精细调整施工工艺，可以有效地提高混凝土施工质量及结构安全性，保证大体积混凝土长期平稳运行。

（四）冷却系统的应用

冷却系统的使用对于大体积混凝土建设非常关键，特别对于水电站重力坝这种需要进行大面积浇注的项目。由于混凝土水化时会产生大量的水化热，而温度的提高又会使混凝土内形成温差，从而诱发热应力及裂缝等问题，对结构安全性和使用寿命造成影响，所以采取有效的冷却措施是特别有必要的。混凝土浇筑前设计团队一般要结合现场的环境，气温以及水泥特性等因素事先拟定冷却系统方案。常见冷却方法有布置冷却管道，冷却水池和喷雾冷却。

所述冷却管道为埋设于混凝土内部，用于循环冷却水以降低混凝土内部温度。该方法能有效地对温度峰值进行控制，保证混凝土均匀稳定。浇筑时工人可以把冷却水温度调节到合适的数值，以维持混凝土硬化初期的低温和减少水化热对混凝土的冲击。另外，冷却水流量及循环频率还需要根据混凝土温度实际变化情况动态调节，才能保证混凝土一直在最佳温度区间。

高温季节进行施工，喷雾冷却措施也是行之有效的办法，将冷却水喷洒在混凝土表面或者使用雾化装置都能使表面温度迅速下降，裂缝较少出现。冷却系统成功运用，不但可以有效地降低混凝土温度、防止温度裂缝产生，而且可以改善混凝土后期强度和耐久性。施工过程中，有必要对冷却系统进行持续的实时监控，以确保其稳定运行，并适时地调整相关的技术参数。采取合理有效的冷却措施才能使大体积混凝土施工得以顺利地进行，为水电站重力坝长期的安全稳定运行提供了坚实的保证。

结束语

在水电站重力坝施工过程中，大体积混凝土的温控措施至关重要，直接关系到工程的质量和安。通过科学合理的温度监测与控制系统、优化混凝土配合比、调整施工工艺以及应用有效的冷却系统等一系列措施，确保了混凝土在水化过程中温度的平稳变化，有效降低了裂缝的风险，提升了混凝土的强度和耐久性。这些温控措施不仅提高了施工效率，也为重力坝的安全运行奠定了坚实基础。随着技术的不断进步和施工经验的积累，未来在大体积混凝土施工中的温控管理将更加精细化和智能化，为水电站建设的可持续发展提供有力支撑。因此，持续探索与应用先进的温控技术，将是保证水电站工程安全和经济效益的重要途径。

参考文献

- [1] 晏国顺, 颜志强, 陕亮. 大古水电站RCC重力坝施工期温控防裂研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(1): 8.
- [2] 周顺田, 张健, 刘东旭, 等. 基于温控仿真的碾压混凝土重力坝防裂措施研究[J]. 人民长江, 2022(003): 053.
- [3] 刘兴辉. 浅谈黄登水电站大体积碾压混凝土温控防裂措施[J]. 国际援助, 2022(4): 121-123.
- [4] 田雪竹. 严寒地区间歇式施工中温控措施的应用[J]. 2022(3).
- [5] 于敬铎. 大坝混凝土温控防裂措施优化研究[J]. 水利天地, 2022(001): 005.
- [6] 曾湜, 胡国平. 混凝土重力坝施工期温度应力仿真分析及温控标准研究[J]. 水电与新能源, 2022, 36(11): 36-40.