

高原寒冷环境下大体积混凝土水化热控制技术研究

王玉宝

新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 大体积混凝土因其良好的承载能力及耐久性能, 在桥梁、隧道、大坝和高层建筑等基础设施工程中得到广泛应用。然而, 在水泥水化过程中, 大量热量释放, 使混凝土内部温度迅速升高, 而外部受环境影响降温较快, 导致显著的温度梯度。这种温差易引发温度应力积累, 导致裂缝产生, 从而影响结构的安全性及耐久性。在高原寒冷地区, 受低温、强风、大气稀薄及昼夜温差剧烈变化等因素影响, 混凝土表层散热速率大幅提升, 温差加剧, 裂缝风险进一步增加。文章针对高原寒冷环境下混凝土水化热的特性, 系统分析温度分布规律及影响因素, 探索适宜的温控技术, 以期为相关工程提供理论支撑及技术借鉴。

[关键词] 高原寒冷; 大体积混凝土; 水化热; 控制技术; 施工工艺; 保温措施

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16301

中图分类号: U445.5

文献标识码: A

Research on Control Technology of Hydration Heat of Large Volume Concrete in Cold Plateau Environment

WANG Yubao

Xinjiang Communications Construction Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Large volume concrete has been widely used in infrastructure projects such as bridges, tunnels, dams, and high-rise buildings due to its excellent bearing capacity and durability. However, during the hydration process of cement, a large amount of heat is released, causing the internal temperature of the concrete to rapidly rise, while the external environment is affected and cools down quickly, resulting in a significant temperature gradient. This temperature difference can easily lead to the accumulation of temperature stress, resulting in the formation of cracks, thereby affecting the safety and durability of the structure. In cold regions of the plateau, the heat dissipation rate of the concrete surface is significantly increased due to factors such as low temperature, strong winds, thin atmosphere, and drastic changes in temperature difference between day and night. The temperature difference intensifies, and the risk of cracks further increases. The article focuses on the characteristics of concrete hydration heat in cold high-altitude environments, systematically analyzes the temperature distribution law and influencing factors, explores suitable temperature control technologies, in order to provide theoretical support and technical reference for related projects.

Keywords: plateau cold; large volume concrete; hydration heat; control technology; construction technology; insulation measures

引言

在高原寒冷地区, 大体积混凝土水化热的释放及传导规律与常规环境存在较大差异。冬季气温低且昼夜温差较大, 强风作用显著, 混凝土表层热量易快速散失, 而内部仍维持较高温度, 形成较大的温度梯度, 进而导致温度应力积累, 使裂缝风险显著提升。此外, 受高原低气压环境影响, 空气含氧量降低, 使水泥水化反应速率减缓, 混凝土性能亦受到一定影响。近年来, 随着混凝土材料及施工技术的不断发展, 低热水泥、矿物掺合料、智能温控系统等新技术的应用, 为大体积混凝土水化热调控提供了新的思路。针对极端气候条件下的混凝土施工, 工程技术人员逐步加深对水化热控制机理的认识, 并结合实践优化控制方案, 以提升混凝土结构的适应性及耐久性。

1 高原寒冷环境下混凝土水化热的特点

1.1 高原寒冷地区环境特征

由于高原地区的地理位置特殊, 长期低温的环境特征

决定了昼夜温差及季节温差较为显著, 使混凝土在初期养护阶段极易受到不利影响, 水化反应速率随之降低, 导致早期强度增长缓慢。与此同时, 空气稀薄导致热容量较低, 混凝土内部释放的水化热难以及时扩散, 从而造成局部温度迅速上升。此外, 由于太阳辐射角度较小且地表反射率分布不均, 混凝土表面温度变化剧烈, 使得温控难度增加, 施工过程中面临更高的技术要求。低温环境不仅延长了混凝土施工及养护周期, 而且对防冻及保温措施的科学性提出了更严格的要求^[1]。为了保证混凝土在寒冷环境下能够正常水化, 提高早期强度发展速度, 施工前需制定合理的温控方案, 包括选用高效保温材料、采用外部加热措施以及优化水泥配合比等, 使混凝土在低温环境下能够保持稳定的水化速率, 从而确保结构的耐久性及安全性符合工程标准。

1.2 大体积混凝土工程特点

大体积混凝土工程的施工过程中, 由于水泥用量显著增加, 水化反应释放的大量热量在内部迅速积聚, 而外部散热

能力有限,导致温度迅速上升,形成较高的温度峰值。混凝土不同区域的温度变化速率存在差异,使温度梯度不断增大,热应力由此逐渐积累。当温度变化过快且混凝土抗裂能力不足时,结构内部及表面容易产生裂缝,进而影响工程的耐久性及安全性。为降低温度梯度过大带来的不利影响,施工过程中需综合考虑水化热的传导特性以及混凝土内部温度的分布情况,合理制定控温措施,例如控制单层浇筑厚度、优化施工间歇时间,并布置冷却管道,以降低温度峰值并缓解温差扩大的趋势^[2]。同时,在混凝土浇筑及养护阶段,必须加强温度监测,通过合理布设测温设备,精准掌握混凝土内部及表面的温度变化情况。根据实时监测数据,需适时调整冷却方案,如增大冷却水流量或采用冰水循环降温,以降低温度不均匀性,使混凝土内部温度更加均衡,确保水化反应稳定进行,避免因温度应力过大而影响整体结构质量。

2 水化热控制的理论基础与现状分析

2.1 水化热生成的化学与物理机制

混凝土的水化过程中,水泥颗粒与水发生化学反应,生成水化产物的同时释放大热量,使混凝土内部温度不断上升。水泥矿物的溶解、分解及重组过程中所释放的化学内聚能,是引起温度升高的主要因素。此外,水化热的扩散并非均匀进行,而是受热传导、对流及辐射等物理机制的共同影响,使混凝土内部温度场呈现复杂的分布状态。温度升高不仅会加快水化反应进程,还会引发热量释放的正反馈效应,使初期热量积聚更加集中,导致局部温差进一步增大,温度应力随之增加。相关研究表明,水化热释放的化学机制与热量传递的物理过程相互作用,共同决定了混凝土内部温度的变化趋势,并对早期强度增长及后期耐久性产生深远影响。

2.2 传统水化热控制技术综述

针对水化热对混凝土施工质量的不利影响,在材料选择方面,通过掺入粉煤灰、矿渣等矿物掺合料替代部分水泥,既能够降低水化热释放总量,又可延缓混凝土内部温升速率,使温度变化更加平稳。在外加剂应用方面,缓凝剂的合理使用可有效降低水化反应的速率,使混凝土内部热量释放趋于均衡,而减水剂的掺入则可优化混凝土的流动性,在保证施工质量的同时减少水泥用量,从而间接减少水化热积聚^[3]。此外,在混凝土浇筑完成后,采取外部覆盖保温材料或进行蒸汽养护,有助于减少外界低温对混凝土表面的影响,避免因温度骤降引起的快速冷却现象,从而降低温度梯度导致的应力裂缝风险。然而,在高原寒冷环境下应用这些传统控温技术于大体积混凝土工程时,仍然面临诸多技术挑战。极端低温不仅使混凝土水化速率显著降低,导致施工周期被大幅延长,同时,寒冷空气亦会加速混凝土表面的热量散失,使得内外温差控制难度进一步增加。在此类特殊环境条件下,传统控温技术的精准度及适应性受到一定制约,难以完全满足混凝土施工质量控制的严苛要求。

3 高原寒冷环境下水化热特性及影响因素分析

3.1 温度场分布与热传导机理

在高原寒冷地区,混凝土内部温度场展现出明显的不均匀性,表现为中心区域的温度较高,而边缘区域则温度迅速下降。水化热在混凝土内部的积累是这种温度分布的主要原因,而其扩散过程则涉及固体内的热传导、界面处的对流以及微弱的辐射效应。通过建立传热方程及对流边界条件的数值模型,可以揭示水化热在混凝土内部的扩散规律,从而形成明显的温度梯度。外部环境的低温及强风等因素对混凝土边缘区域的热量散失起到了加剧作用,进一步导致内外温差的扩大,从而影响整个温度场的演化。

3.2 水泥水化反应与温度变化规律

水泥水化过程中,温度的变化与水泥的化学反应密切相关,不同水泥的品种及其配合比决定了水化反应速率及热量的释放,从而形成初期快速上升,之后逐渐降低的典型温度变化曲线。掺入矿渣、粉煤灰等矿物掺合料,会显著减缓水化反应的速率,延迟温度峰值的出现,并降低水化热的释放速率,从而减小混凝土内部的温度梯度。这些因素在水泥水化过程中至关重要,它们不仅反映了水泥的化学特性,也受到外部配合比调整的影响,成为研究水化热演化规律的重要依据。

3.3 关键影响因素探讨

多种因素共同作用,影响着混凝土水化热特性,包括材料性质、施工工艺及环境条件等。在材料方面,水泥种类、水灰比及掺合料比例直接决定水化反应的速率及热量释放量,是温度场形成的基础。施工工艺方面,浇筑方式、施工周期以及分层布置等都会影响水化热的积累与扩散路径,从而影响温度场的均匀性与温度梯度的大小。环境条件,特别是外界温度、风速及湿度等因素,对混凝土表面热量散失及内部热量积累起着决定性作用。尤其在高原寒冷环境中,低温与强风共同作用,使混凝土边缘区的热量快速流失,进一步加大了内外温差。

3.4 实验与模拟研究方法

结合实验测试与数值模拟的方法,能够更系统地揭示混凝土水化热特性及温度场分布。通过在混凝土内部不同位置布置温度传感器,实时收集的数据直接反映了材料特性、施工工艺与环境条件对温度变化的影响。此外,采用有限元法或有限差分法,建立的数学模型能够准确模拟温度梯度、热流分布及应力状态。这些实验与模拟方法相结合,使得不同影响因素的作用机制得以量化,通过对比分析实验结果与模拟数据,进一步深入探讨水化热释放规律及其在混凝土内部的扩散行为。为高原寒冷环境下混凝土温度场的形成机制提供了可靠的理论依据。

4 高原寒冷环境下大体积混凝土水化热控制技术的研究

4.1 材料选择与配合比优化

在高原寒冷环境下,大体积混凝土水化热的控制核心

在于材料的选择与配合比的合理优化。低热水泥的使用有效地降低了水化热的释放，从源头减少了混凝土的温升，延缓了温度峰值的到来。同时，掺入适量的矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣)能够优化水化反应的进程，改善温升曲线，并增强混凝土的抗裂性。此外，采用骨料预冷技术能显著降低混凝土的初始温度，减缓水化热的积累效应。对冰屑的适量掺入，在水泥水化过程中，通过冰的融化吸热，能平缓温度的上升，有效控制混凝土内部温度变化。

4.2 低温环境下的施工工艺优化

在高原寒冷环境中，通过合理的施工工艺，可以有效控制混凝土的温度梯度，避免因温差引发的热应力裂缝。分时段浇筑的策略将大体积混凝土分为多个施工批次，预留足够的散热时间，确保每批次浇筑后的水化热得到充分释放，从而减缓整体温升过程。采用间歇浇筑方式，有助于平衡混凝土内部温度变化，减少热应力集中^[4]。在此基础上，外加剂的协同应用能够进一步改善混凝土的温控效果。例如，缓凝剂能够延缓水泥水化反应的速率，使温升过程更加均匀；减水剂则优化了混凝土的流动性，合理控制了水泥用量，从而间接降低了水化热的释放。在高原地区特殊的温差条件下，这些施工工艺的优化能够有效降低混凝土内部温度梯度，提升整体结构的耐久性与安全性。

4.3 保温与隔热措施设计

对于高原寒冷环境下的大体积混凝土，保温与隔热措施至关重要。在选择保温材料时，高分子保温材料和发泡混凝土板等高效保温材料能够有效减少热量损失，降低混凝土表面的冷却速率。在混凝土浇筑后，应立即覆盖保温层，并确保保温材料与混凝土表面紧密结合，以最大程度减少外界低温对混凝土内部温场的干扰。通过实时监测混凝土内部及表面温度的变化，动态调整保温层的厚度，可以更精确地调控温度。根据不同施工阶段的需求，采用分层设计的保温体系，能够适应温度变化，确保混凝土结构稳定。这些保温与隔热措施的系统应用使混凝土在寒冷环境中的温控更加精细，避免了由于外界温度波动导致的裂缝问题，保证了工程质量和安全性。

4.4 分层分块浇筑与温度梯度控制

合理划分浇筑层厚度是有效控制水化热积聚及温度梯度的有效手段，尤其是在高原寒冷环境下。通过分层浇筑，大体积混凝土的温度上升过程更加平稳，能够确保每层厚度依据水化热传导模型进行计算，从而合理释放内部热量，避免局部温度过高。此外，通过合理安排浇筑顺序，能够降低不同层次间的温度梯度，减少温度应力的集中。层间温度应力的分析是确保混凝土质量的关键，预留适当的散热时间以及结合实时温度监测数据评估层间温差，能够有效防止因温差过大引发热裂缝的形成。在必要情况下，可采用补水养护或增加保温措施，以降低层间温差效应，促进混凝土内部温度场的均匀化，从而增强结构的稳定性与耐久性。

4.5 混凝土养生及温度监控

启动循环冷却水时，当某一层的冷却水管被混凝土完全

覆盖至规定高度后，应立即启动该区域的冷却水管供水，以尽量减少新旧混凝土之间的温差，从而防止因温差过大而引起混凝土开裂。在运行过程中，必须实时监控冷却水的流量，确保进出口水温的温差控制在6℃以内；若检测到温差超过6℃，应立即增大进水流量，并选用冰水进行循环降温处理。

混凝土养生方面，承台浇筑完成后应立即对保温大棚进行全面、严密地封闭，同时及时平整混凝土表面，根据现场实际情况采用足够数量的热风幕机进行大棚升温。混凝土在灌注过程中及终凝前，利用大棚内封闭条件并结合现场温度和湿度，启动蒸汽养护系统以实现有效的保湿保温；在混凝土终凝后，则根据棚内温度要求继续进行蒸汽养护，并利用部分冷切水管出水口流出的热水对混凝土表面进行洒水，保持表面湿润，同时对混凝土试块进行同步养生处理。

温度监控过程中，养生期间必须做好全面的温度检测工作：在承台周围悬挂3至4台测温仪用于监测空气温度，在承台混凝土表面设置2台测温仪实时监控表面温度，同时利用埋设式测温仪检测混凝土内部温度，并在进、出水管处各放置1台测温仪持续监控进出水温。混凝土浇筑后，每4小时进行一次温度测量，连续监测不少于15天，并由专人跟踪记录养生温度，详细记录混凝土温度上升的峰值及达到目标温度所需的时间，依据监测结果及时调整冷却水流量和供水时间，确保混凝土内外温差始终控制在25℃以内。

5 结语

在高原寒冷环境下，如何有效控制大体积混凝土水化热的释放，是确保结构安全性及施工质量的核心问题。本文围绕水化热的化学反应及传热特性展开分析，并结合高原地区气候特征，探讨温度场分布规律及关键影响因素，进一步提出针对性的温控策略。优化水泥种类及配合比，可有效降低混凝土初始温度，延缓水化热释放速率；通过骨料预冷及冰屑掺入技术，可在混凝土水化过程中调节温升幅度；采用分批浇筑、间歇施工及外加剂调控策略，可减小水化热峰值，优化温度场分布；合理应用保温隔热措施，有助于降低温度梯度，减少温度应力影响；结合实时监测系统，利用冷却水循环及蒸汽养护技术，可实现精准控温，提高混凝土耐久性。

[参考文献]

- [1]向前. 桥梁工程大体积混凝土水化热控制施工技术应用研究[J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38(4): 149-150.
- [2]王建彬. 桥梁工程大体积混凝土水化热控制施工技术研究[J]. 交通建设与管理, 2014(20): 114-116.
- [3]张进红, 金宝华, 年永林, 等. 基础底板超大体积混凝土水化热控制技术[J]. 建筑技术, 2018, 49(7): 706-709.
- [4]魏冠华, 李健. 大体积混凝土水化热研究及仿真分析[J]. 四川建筑, 2019, 39(2): 309-314.

作者简介: 王玉宝(1994.9—), 毕业院校: 兰州理工大学, 所学专业: 土木工程, 当前就职单位名称: 新疆交通建设集团股份有限公司, 职称级别: 中级, 单位职务: 项目副总工。