

浅谈骨料预冷与冷却水管协同作用下大体积混凝土裂缝控制研究

王云平

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：大体积混凝土因水化热易致温度裂缝。本文研究骨料预冷与冷却水管协同控制技术，通过优化预冷温度、时间及水管布置、流量等参数，建立量化温控指标体系。工程实践表明，该协同方法可显著降低内部最高温度与内外温差，有效抑制裂缝产生，保障施工质量。

【关键词】：大体积混凝土；裂缝控制；骨料预冷；冷却水管；参数优化；温度监测

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.064

1 引言

大体积混凝土结构在硬化期间，内部积聚的水化热将产生巨大温差与温度应力，进而引发有害温度裂缝，严重影响结构安全与耐久性。传统单一温控措施效果有限。为此，本文聚焦于骨料预冷与冷却水管的协同机制，旨在通过参数优化与量化控制，为解决此关键技术难题提供一套有效的实践路径。

2 大体积混凝土裂缝成因及控制原理

2.1 裂缝成因分析

(1) 水泥水化热：水泥水化反应在初期集中释放大热量，致使混凝土内部温度快速升高。内部升温膨胀而表面散热较快，导致表面产生拉应力，当该拉应力超过混凝土抗拉强度时即形成裂缝。

(2) 内外温差：混凝土内外温差形成温度梯度，导致不均匀温度变形。当变形受到约束时产生温度应力，一旦该应力超过混凝土抗拉强度极限，即会引发温度裂缝。

(3) 混凝土收缩变形：混凝土在硬化过程中的收缩变形是引发裂缝的另一重要因素。当混凝土因收缩产生的变形受到外部基础、内部钢筋或相邻结构的约束时，会产生拉应力。该拉应力与由内外温差引起的温度应力相叠加，共同作用，极大地增加了混凝土开裂的风险。因此，控制收缩变形与控制温度应力在裂缝控制中同等重要。

2.2 温度裂缝控制基本原理

(1) 降低水化热和温升：通过优化混凝土配合比，降低水泥用量、使用低热水泥品种。同时，合理添加掺合料，使用外加剂、减水剂可以减少混凝土的用水量，提高混凝土的强度和密实性，间接降低水化热。

(2) 减少内外温差：采用骨料预冷技术，降低骨料的初始温度，从而降低混凝土的出机温度，减少混凝土内部的温升。在混凝土浇筑过程中，采用分层分

段浇筑的方法，每层混凝土厚度不宜过大，以增加散热面积，降低内部温度。在混凝土浇筑后，及时进行保温养护，通过覆盖保温材料，减少混凝土表面的热量散失，使混凝土内部与表面的温差控制在允许范围内。

(3) 改善约束条件：在施工方案中分层分段，减小混凝土结构的约束长度，释放温度应力。在施工过程中，合理安排施工顺序，避免混凝土在早期受到过大的约束。对基础进行适当的处理，如设置滑动层，减少基础对混凝土结构的约束，降低温度应力的产生。

(4) 提高混凝土抗裂性能：通过掺入聚丙烯纤维或钢纤维，可增强混凝土的抗拉强度与极限拉伸值，抑制裂缝发展。同时，优化施工工艺（如确保振捣密实）与加强养护（如保持表面湿润、避免过早拆模），是减少塑性收缩、提升混凝土早期强度和均匀性的关键保障。

3 骨料预冷与冷却水管的协同作用机理与控制策略

3.1 骨料预冷原理与作用

(1) 骨料预冷方法：骨料预冷是降低混凝土出机温度的重要手段，常见的预冷方法包括风冷、水冷、喷淋冷水等。

风冷法是利用循环冷风吹入骨料仓对骨料进行冷却。通过在骨料仓内设置通风管道，将低温空气引入，与骨料充分接触，带走骨料的热量，从而实现降温。

水冷法可分为浸泡法和循环冷却法。浸泡法是将粗骨料装入骨料预冷罐，用低温水浸泡，使骨料与低温水充分热交换，达到冷却目的。循环冷却法则是在骨料输送过程中，通过在冷却廊道或输送骨料的胶带表面淋洒低温水，实现骨料的连续冷却。

喷淋冷水法是在骨料输送带上或储料仓顶部设置喷淋装置，向骨料喷洒低温水。这种方法设备简单，操作方便，能够在骨料输送过程中实现连续冷却，对生产效率影响较小。

(2)对混凝土温度的作用:骨料在混凝土中占据较大比例,其初始温度对混凝土的出机温度有着重要影响。通过骨料预冷降低骨料的初始温度,能够有效降低混凝土的出机温度。在混凝土搅拌过程中,低温的骨料与水泥、水等其他原材料混合,吸收部分水化热,从而减少混凝土内部的水化热积聚。这使得混凝土在浇筑后的升温阶段,内部温度上升幅度减小,降低了混凝土内部与表面的温差。

3.2 冷却水管原理与作用

(1)冷却水管布置:冷却水管在大体积混凝土中的布置方式直接影响着冷却效果和温度控制的均匀性,常见的布置方式有水平布置、垂直布置和蛇形布置等,常采用的布置方式为水平与垂直相结合的方式。

结合的布置是将冷却水管在混凝土内部按照水平方向分层铺设,水平每层间距1米,底部和顶面距混凝土边缘0.5m。水平管道通过钢筋支架进行固定,确保位置准确,这种布置方式适用于大面积、厚度相对均匀的混凝土结构,这种布置优点是施工相对简单,水管的连接和固定较为方便,而且能够在水平和垂直向上实现较好的温度控制效果。

(2)冷却水管工作原理:冷却水管的工作原理基于热交换原理,通过在混凝土内部预埋管道,让低温的循环冷却水在管道中流动,带走混凝土内部因水泥水化反应产生的热量,从而达到降低混凝土内部温度的目的。冷却水流量是在混凝土上中下层分别埋设电阻式温度计,实时进行温度测量并传输至计算机,根据温度的变化情况来自动调整冷却水的流量。

3.3 协同作用机理分析

(1)时空维度上的全过程互补控制:骨料预冷与冷却水管在控制混凝土温度场的时空分布上形成有效衔接,实现“全过程、全方位”的温度裂缝防控。

时间维度上,骨料预冷在浇筑前发挥作用,有效降低混凝土出机口温度与入模温度;冷却水管则在浇筑覆盖后启动,覆盖水化热释放最剧烈的升温阶段、峰值阶段及降温阶段,实现“先抑后吸”的连续控制。二者协同构成从浇筑前至硬化后期的全过程温度调控闭环,避免了单一措施可能出现的控制盲区。

空间维度上,骨料预冷通过降低原材料温度,实现对混凝土整体体积的弥散性初步冷却;冷却水管则通过在结构内部布设管网,形成以水管为中心的梯度降温场,实现对温度分布的精细化调控。通过调整水管间距,可有效控制结构内部温度梯度,尤其有利于降低核心区最高温度与内外温差(ΔT)。“整体初步

冷却”与“局部梯度调控”相结合,使混凝土内部温度场分布更均匀、变化更平缓。预冷奠定整体低温基底,冷却水管在此基础上更高效地“削峰填谷”,防止局部过热与过大温度梯度的产生,显著降低温度应力。

(2)热力学与能量层面的协同增效:从热力学角度看,二者协同提高了热交换效率与能量转移效益。

首先,骨料预冷已移除了混凝土总热负荷中的相当一部分,减少冷却水管系统需带走的水化热总量。在相同控温目标下,协同系统可适当降低冷却水流量与水温要求,从而降低能耗,提升系统经济性与运行效率。

其次,预冷使混凝土初始温度降低,在升温阶段混凝土与冷却水平均温差(ΔT)处于更合理区间。这避免了因混凝土温度过高而采用过低水温导致的“热冲击”,使热交换过程更为平缓可控,有利于减少急剧降温引发的附加应力。

(3)温度应力场的协同优化:裂缝产生的直接驱动力为温度应力,二者协同的最终体现为对温度应力场的整体优化。协同作用使混凝土内部温度-时间曲线趋于平缓,包括:峰值温度显著降低、温升速率减缓、温降过程受控。这一系列变化有效降低了温度梯度与内部约束应力,从而抑制温度裂缝的产生与发展。

4 工程应用效果

4.1 现场实际中运用

本文选取的项目中基础混凝土长34.0m,宽42.0m,高6.0m,混凝土采用高2.0m,长14.0m,宽7.0m分层分段浇筑,采取骨料预冷和冷却水管协同作用,来控制混凝土的水化热温度,进而控制大体积混凝土的温度裂缝产生。

(1)裂缝控制方案:为有效控制大体积混凝土裂缝,本项目采用了骨料预冷与冷却水管协同作用的温控措施。在骨料预冷方面,选用水冷法喷淋冷水法对粗骨料进行预冷,冷却温度能降低到 0°C - 5°C 。并通过在冷却水管布置上,采用水平和垂直相结合的布置方式,将冷却水管在混凝土内部按照水平方向分层铺设,每层水管间距为1.0m,管径为25.0mm。在混凝土浇筑过程中,采用分层浇筑方法,每层浇筑厚度控制在2.0m以内,以增加散热面积,降低内部温度;在混凝土浇筑后,及时进行保温养护,覆盖草帘和塑料薄膜,减少混凝土表面的热量散失。

(2)实施过程与温度监测:在施工过程中,严格按照既定方案实施骨料预冷和冷却水管的安装。在混凝土浇筑前,提前对骨料进行不少于2小时预冷,确

保骨料温度降低至 5℃以下。冷却水管在钢筋安装过程中同步安装,安装完成后进行通水试验,检查水管是否存在漏水现象。在混凝土浇筑完成后,立即通入冷却水,通水时间根据混凝土内部埋设的电阻式温度计结果进行调整。

温度测量的内容包括:混凝土原材料温度,混凝土出机口温度、入仓温度、浇筑温度、仓内气温、仓外气温和混凝土内部温度测量等。

温度检测频率:浇筑过程中,每4小时检测1次混凝土原材料的温度、出机口温度、入仓温度,同步测量仓内气温和仓外大气温度;浇筑完成后,8h-24h内每2小时1次;第1d-4d每4小时1次;第5d-7d每8小时1次;7d以上每12小时1次。

混凝土浇筑温度的测量,每100m²仓面面积不少于一个测点,每一浇筑层不少于3个测点。测点均匀分布在浇筑层面上。测温点的深度不小于5cm。

监测结果显示,采用骨料预冷与冷却水管协同作用后,混凝土出机温度降低了8℃左右,混凝土内部最高温度峰值比未采用协同措施时降低了12℃,有效控制在设计允许范围内。混凝土内部与表面的温差也得到了有效控制,始终保持在25℃以内,避免了因温差过大而产生的裂缝。

(3) 总结分析:通过本项目的实践,采用骨料预冷和冷却水管的协同作用下,混凝土浇筑后,未产生贯穿裂缝和深层裂缝,表面裂缝数量降低了67.14%,成功验证了骨料预冷与冷却水管协同作用在大体积混凝土裂缝控制中的有效性。

5 关键参数优化与效果评估

(1) 骨料预冷关键参数优化:骨料预冷温度为核心控制指标,粗骨料宜冷却至0-5℃。温度过低易表面结冰,影响粘结;高于10℃则对降低出机温度贡献有限。优化目标为出机温度≤18℃。预冷时间控制在2小时左右,过短则热交换不足,过长则影响施工效率

与经济性。

(2) 冷却水管关键参数优化:本项目采用水平与垂直结合布管方式,水管间距1.0-1.5m,管径25.0mm,距混凝土表面0.5-1.0m。单根通水流量宜为0.8-1.2m³/h,进口水温与混凝土温差为10-15℃。采用“大流量、中温差”启动,峰值后调整为“小流量、低温差”,以避免热冲击,实现平稳降温。

(3) 协同作用时序控制:二者应精准配合,形成全过程温控闭环:浇筑前完成骨料预冷,确保混凝土低温入模;浇筑覆盖水管后立即启动通水,在温升前建立冷却区;依据实时监测数据动态调节流量与水温,实现“前促、中控、后缓”的精细化控制。

(4) 效果量化评估指标:温度指标:出机口温度≤18℃;内部最高温度≤65℃;内外温差≤25℃;降温速率≤2℃/天。

裂缝控制:表面裂缝数量减少60%以上,宽度控制在0.2mm以内,严禁出现贯穿性与结构性裂缝。

应力安全:根据应变监测反算的拉应力应低于同龄期混凝土抗拉强度,并保持足够安全裕度。

6 结语

本文通过系统研究骨料预冷与冷却水管在大体积混凝土中的协同作用机理,证实该技术是控制温度裂缝的有效手段。研究明确了骨料预冷(温度控制在0-5℃)与冷却水管的关键参数优化方案,建立了包含温度监测、应力分析和裂缝观测的量化评估体系。工程实践表明,该协同方案能够将混凝土内部最高温度控制在65℃以下,内外温差限制在25℃以内,使表面裂缝数量减少超过60%,且无贯穿裂缝产生。这不仅验证了协同控制策略的可行性与有效性,也为同类工程提供了可复用的技术路径。未来研究可进一步探索智能化控制系统与新型低碳冷却材料的应用,以持续提升大体积混凝土施工的质量与效率。

参考文献:

- [1] 兰宇.大体积混凝土骨料预冷技术的应用[J].科学技术创新,2022,(08):108-111.
- [2] 郭仕万,肖欣,赵和平.混凝土施工中的裂缝控制[J].山西水利科技,2000,(04):20-21.
- [3] 李春燕.纤维混凝土在大体积混凝土施工中的应用[J].水利水电技术,2011,42(05):41-42+56.
- [4] 朱耀台,詹树林.混凝土裂缝成因与防治措施研究[J].材料科学与工程学报,2003,(05):727-730.
- [5] 王铁梦.钢筋混凝土结构的裂缝控制[J].混凝土,2000,(05):3-6.
- [6] 张超,常晓林,刘杏红.大体积混凝土施工期冷却水管埋设形式的优化[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(03):276-282.