

水利工程大体积混凝土温控防裂施工技术

金育辉

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

【摘要】：大体积混凝土温度裂缝是水利工程施工阶段最具威胁性的质量病害之一，其根源在于水泥水化热积聚引起的内外温差和温度应力。本文系统阐述了水工大体积混凝土温控防裂的完整技术体系。在材料层面，分析了低热水泥、矿物掺合料及外加剂对降低水化热和延缓放热速率的作用机理；在浇筑工艺层面，论述了分层分块浇筑、合理的浇筑顺序及入仓温度控制对削减温度峰值的关键作用；在温控养护层面，重点探讨了冷却水管布设、表面保温及智能温控监测系统的协同工作逻辑。研究表明，大体积混凝土温控防裂应遵循“降热、散热、缓冷、保温”的八字方针，将材料优选、施工工艺与动态监测有机结合，构建全过程、立体化的温度应力控制体系，方能有效遏制温度裂缝的产生。

【关键词】：大体积混凝土；水化热；温度裂缝；温控防裂；冷却水管

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.064

1 引言

大体积混凝土是水利工程构筑物的基本结构形式。重力坝、拱坝、船闸底板、泵站流道、泄洪闸墩等关键部位，无一例外都是大规模混凝土连续浇筑^[1]。这类结构共性就是截面尺寸大、一次浇筑方量多、水泥水化热积聚明显。大体积混凝土和普通混凝土结构的不同之处在于，大体积混凝土中水泥水化产生的热量不能迅速散发出去，导致内部温度急剧上升，而混凝土表面的热量散失较快，内外之间形成陡峭的温度梯度^[2]。温度梯度引起的不均匀膨胀、收缩，在结构内部产生很大的温度应力，当应力大于混凝土某龄期的抗拉强度时，裂缝就不可避免地出现。

2 原材料优选与配合比优化

2.1 胶凝材料体系的设计

水泥品种及用量是决定水化热总量和放热速率的首要因素。大体积混凝土宜用低热硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥。低热水泥的水化热比普通硅酸盐水泥低 25%到 30%，对控制温升峰值、延缓温升速率有决定性的作用。在保证设计强度等级的基础上，尽量减小单位体积混凝土的水泥用量，这是从源头上减少水化热的主要方法^[3]。

矿物掺合料的加入是降低水化热的又一途径。粉煤灰在混凝土中既有填充作用又有火山灰活性，掺入后可以部分代替水泥，直接减少水化热的产生。粉煤灰的火山灰反应是放热反应，但是反应速率远小于水泥的早期水化，可以将水化热释放曲线向前推移，使温度峰值下降并提前出现，给热量散发争取了更多的时间^[4]。矿渣粉也具有较好的减热作用，掺入矿渣粉可以改善混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能，提高耐久性。粉煤灰掺量一般为胶凝材料总量的 20%~40%，矿渣粉掺量可达到 30%~

50%，具体掺量应通过试验确定。

2.2 外加剂与骨料质量控制

缓凝型高效减水剂在大体积混凝土中有双重作用，一方面可以明显减少单位用水量，减少水泥用量；另一方面可以延长混凝土初凝时间，使各层混凝土在初凝前完成衔接，防止出现冷缝，还可以延缓水化热释放速度。膨胀剂可以补偿混凝土的收缩变形，但是必须严格控制掺量，防止过度膨胀而造成结构破坏。

骨料质量控制也不能小视。粗骨料应选用级配良好、质地坚硬、吸水率低的碎石或卵石。最大粒径的确定要兼顾结构配筋间距和泵送要求，在条件允许的情况下可以选用较大的粒径来减少单位体积混凝土的浆体用量。细骨料应选用级配良好的中砂，细度模数控制在 2.3~3.0 之间。骨料的含泥量、有害物质含量必须符合规范要求。

2.3 配合比设计的综合优化

大体积混凝土的配合比设计不是单一指标的达标，而是工作性能、力学性能、热学性能和耐久性能的综合平衡。工作性能上混凝土要具有较好的流动性、黏聚性及保水性，利于泵送和振捣密实，但不能过大，否则会增大水泥浆用量和水化热总量。力学性能上，设计强度等级的确定要充分考虑结构受力特点以及龄期强度增长规律，不能因为过分重视高强而造成水泥用量过大。热学性能上要进行绝热温升试验和导热系数试验，得到混凝土的热力学参数，为温控计算提供依据。耐久性能上根据工程所在环境类别来选择抗冻、抗渗等耐久性指标，选择合适的引气剂、矿物掺合料。

3 混凝土浇筑工艺的温度控制

3.1 分层分块浇筑的工艺设计

分层分块浇筑是减小大体积混凝土温度应力最基本、最有效的方法。分层浇筑把大体积混凝土分成若干个厚度较小的浇筑层,每层混凝土的水化热相对减少,散热条件得到改善,温度峰值也相应降低。分块浇筑是将大面积底板或者长条状结构分成若干个独立施工块,块与块之间设施工缝或者后浇带,等各个块的混凝土收缩基本完成后,再进行接缝灌浆。

浇筑层厚度的确定要考虑结构尺寸、配筋密度、施工机械能力及温控要求。层厚过大,下部混凝土水化热无法散去;层厚过小,施工缝多、工作量大。相邻两层混凝土浇筑间隔时间必须严格控制,间隔太短,下层混凝土没有达到足够的强度来承受上层荷载,间隔太长,下层混凝土表面已经初凝,造成层间冷缝。合理的间隔时间在下层混凝土初凝后、终凝前完成上层覆盖,使两层混凝土成为一个整体。

3.2 入仓温度与浇筑温度的控制

混凝土入仓温度直接影响到混凝土的初始温度状态,是温控链条的起始点。入仓温度高,表示混凝土在浇筑前就已具有较高的初始温度,水化热叠加之后温度峰值更高。降低入仓温度的主要措施有骨料预冷(风冷、水冷)、混凝土拌合用水冷、胶凝材料入仓前冷却等。

浇筑温度的控制包括运输、入仓、平仓、振捣等各个环节。高温季节施工时,应采取遮阳或者降温措施对运输车辆、泵送管道加以保护,减少混凝土在运输、等待过程中暴露的时间。混凝土入仓后要要及时平仓、振捣,防止仓面长时间暴露而造成温度回升。低温季节施工防止混凝土冻害,采用保温运输、加热拌和水等方法。

3.3 合理浇筑顺序与连续作业组织

合理的浇筑顺序是保证混凝土质量、温度场均匀性的必要条件。大型底板应采用“跳仓法”施工,将底板分成若干施工块,按一定的顺序间隔浇筑,先浇筑的施工块完成部分收缩后,再浇筑相邻块,减小相邻块之间约束应力。坝体混凝土应采用“薄层连续浇筑”方式,每层厚度控制在1.5~3.0米之间,下层混凝土终凝后立即覆盖上层,在保证层间结合质量的同时缩短层间间隔时间。

连续作业的组织要考虑混凝土供应能力以及施工机械的配备情况。混凝土搅拌站的供料能力、运输车辆的调配、泵送设备的布置、振捣棒的数量和规格等都要与浇筑速度、层厚相适应。浇筑过程中不能出现长时间的中断,以免产生冷缝。坝体混凝土浇筑时,每层浇筑完毕要及时进行抹面处理,清除

表面的泌水和浮浆。

4 表面保温与养护技术

4.1 表面保温的原理与作用

混凝土浇筑后表面直接暴露在大气环境中。大体积混凝土内部温度较高时,若表面散热过快,内外温差迅速增大,表面会承受较大的拉应力,很容易产生表面裂缝。表面保温的作用就是减缓表面热量的散失速度,使内外温差始终处在安全范围内。表面保温和内部冷却水管构成内外协同的温度调节系统,内部依靠通水冷却带走多余的热量,外部依靠保温减慢热量散失的速度,两者共同把温度梯度和降温速率控制在安全范围内。

4.2 保温材料的选择与铺设

保温材料选择要考虑保温性能、施工方便和经济性。常用的保温材料有保温板、草袋、土工布覆盖、保温被等。严寒地区或者冬季施工时,可以使用复合保温构造,即底层设保温板,上层盖防雨布。在浇筑好的混凝土表面铺设保温层的时候,要保证保温层和混凝土表面紧密接触,防止形成空气层,从而形成对流散热通道。

保温层拆除时间要按照混凝土内部温度监测数据和外界环境温度共同来判定。混凝土内部温度降到安全水平后,外界环境温度趋于稳定时,才可以开始拆除保温层。拆除要分层进行,防止突然暴露造成温差急剧变化。

4.3 养护制度的建立与执行

养护是保证混凝土强度发展、耐久性的基本条件。大体积混凝土养护的主要要求就是保持表面湿润,防止由于表面水分蒸发过快而产生的干缩裂缝。养护方式有覆盖洒水养护、蓄水养护、喷涂养护剂等。高温季节养护用水温度不能过低,以免给混凝土表面带来冷冲击。养护周期应符合设计强度及规范要求,一般不少于14天。对重要的结构部位(坝体上游面、溢流面等)的养护周期要适当延长。

5 智能温控监测与反馈调控

5.1 温度监测系统的布设

温度监测是温控施工的眼睛。混凝土浇筑前要根据结构特点及温控计算结果,在典型断面及关键部位埋设温度传感器。传感器的布置要覆盖混凝土内部各个深度,从而得到完整的温度场分布信息,即表面、近表面、中心、底部等各处的温度变化数据。传感器应选用数字式温度计或者光纤测温系统,精度高、稳定性好。

5.2 数据采集与动态反馈

智能温控系统的主要价值就是把监测到的数据即时转换成控制指令。采用自动化数据采集系统，温度数据可以实时上传到监控平台，得到温度—时间曲线以及温度场分布云图。当混凝土内部温度大于设定的阈值、内外温差大于允许值或者降温速度过快的时候，系统就会发出报警信号。根据监测数据，现场技术人员可以及时调节通水流量、通水温度、保温层厚度等控制参数来达到温控的目的。

5.3 温控效果的评估与反馈

温控效果的评定要贯穿施工全过程。浇筑初期主要看温度峰值、温升速度是否正常；中期主要看内外温差、降温速度，评价冷却水管运行状况、保温层效果；后期主要看最终温度状态，为拆模及后续施工提供依据。评估结果要反馈到后面仓位的温控设计上，依靠施工过程中不断地积累来改善温控参数并改变施工方案。为了方便现场施工管理以及质量控制，根据不同的季节施工条件，对各个温控环节的技术要点进行了系统的比较，为实际施工提供操作性的依据。

表 1 大体积混凝土温控防裂施工技术要点对比（按施工季节）

控制环节	夏季高温季节	冬季低温季节	春秋温和季节
骨料温度控制	风冷或水冷预冷，遮阳堆放	防冻处理并加热	自然温度控制
拌和水温度	≤15℃冷水拌和	热水拌和，防冻	自然温度
入仓温度	≤12~15℃（按设计）	≥5℃，防冻	自然入仓
浇筑层厚	1.5~2.0m，利散热	可适当增大	常规层厚

参考文献：

[1] 马锦瑞.水利工程大体积混凝土温控防裂施工技术研究[J].行车指南,2025(9):0091-0092.

[2] 吴广亮,卢南群,李兵彬,等.泵站大体积混凝土温控防裂技术及工程实践[J].广东水利水电,2026(3):87-91.

[3] 王延昌,王洪建.大型水利工程中大体积混凝土施工技术应用分析[J].水上安全,2025(11).

[4] 杨婉朋,杨发智,刘俊昌.水利工程给排水蓄水池大体积混凝土施工温控防裂技术研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(2):416-418.

浇筑间隔	缩短，防冷缝	适当延长，保结合	常规间隔
冷却水管	提前通水，侧重一期冷却	延后通水，防降温过快	按设计通水
表面保温	保湿为主，辅以遮阳	加强保温，全覆盖	常规养护
养护方式	洒水+覆盖	保温保湿复合养护	常规养护
监测频率	2~4 小时/次	常规监测	常规监测
温控重点	防温升峰值过高、内外温差过大	防冻、防降温过快	常规控制

6 结论

大体积混凝土温控防裂属于水利工程施工中系统性、技术含量最高的质量控制环节。研究表明，大体积混凝土温控防裂施工质量控制要遵循以下基本原则，在材料端采用低热水泥、矿物掺合料和缓凝外加剂的组合使用，从源头上减少水化热总量、延缓放热速率；在浇筑端采用分层分块、合理入仓温度、连续作业组织，控制温度峰值和温度梯度；在温控端采用冷却水管的合理布置和精准通水控制，主动调节温度场分布；在养护端采用表面保温和保湿养护相结合的方式，减小内外温差、延缓降温速率。这四个环节互相联系，形成一个从源头控制、过程减少、主动调节、末端保护的全链条闭环式温控防裂系统。智能温控监测技术的运用使得温控措施由原来的依靠经验判断变成依靠数据驱动，从而完成了从静态方案到动态调控的转变。全过程、立体化的温度应力控制可以有效地防止温度裂缝的产生，保证大体积混凝土结构的整体性以及长期耐久性。