

碾压混凝土温控措施研究

刘 虎 余勇扬

中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津 300222

【摘要】：碾压混凝土具有施工速度快、经济效益好、耐久性好等特点，在水利水电大坝、市政水利工程等大体积混凝土结构中应用较多。大体积碾压混凝土在水硬化过程中，水泥水化热释放速度过快，内部温升过高，内外温差过大，容易造成结构表面或内部出现裂缝，严重影响工程结构整体性、耐久性和使用寿命。本文根据碾压混凝土施工特点和温控主要要求，对温度应力产生的主要机理进行分析，从原材料选择、配合比优化、施工全过程控制、后期养护保护、温度实时监测五个方面提出完善的碾压混凝土温控防裂措施，并通过工程实践检验措施的实施效果，为类似大体积碾压混凝土工程的温控施工提供理论参考和实践依据，提高碾压混凝土结构工程整体施工质量。

【关键词】：碾压混凝土；温控防裂；温度应力；大体积混凝土

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.008

引言

近些年来，我国水利水电、防洪抗旱、水资源调配等基础设施建设不断推进，碾压混凝土施工技术由于其薄层碾压、快速施工、成本可控等特点，成为大体积混凝土坝体施工的主要技术之一。相比于常规混凝土，碾压混凝土胶凝材料用量少、拌合料坍落度接近于零，施工工艺和温控要求也存在较大差别，但是大体积结构水化热温控问题仍是施工控制的重点。施工过程中如果温控措施不到位，混凝土内部水化热积聚不能迅速散发出去，就会产生较大的内外温度梯度，当温度应力超过混凝土自身抗拉强度的时候，结构裂缝就会产生，这种裂缝不但会降低结构的承载能力，还会引起渗水、钢筋锈蚀、冻融破坏等一系列后续问题，严重影响工程的使用寿命。

目前碾压混凝土温控施工已经由原来的后期养护为主向全过程、全方位的主动预控转变，主要从源头上减少水化热产生、过程中控制温度梯度、后期做好保温保湿防护，结合实时监测进行动态调节。本文结合工程实践经验，从碾压混凝土温控的关键环节入手，对各种可行的温控措施进行系统的梳理，分析各个措施的应用场景及实施要点，明确全过程温控的主要控制要点，进一步完善碾压混凝土温控技术体系，促进施工技术的规范化、精细化发展。

1 碾压混凝土温控核心机理

碾压混凝土温控的主要目的就是控制水化热温升、降低内外温差、减小温度应力，防止温度裂缝的产生。温度变化和应力产生分三个阶段，第一阶段为温升期，混凝土浇筑后，水泥与水反应产生水化热，大体积结构内热量传递慢，温度迅速升高到峰值，这是温控控制的关键时期；第二阶段为降温期，水化热消耗完后，混凝土内部热量向外散发，温度慢慢降低，体积跟着收缩，容易出现收缩应力；第三阶段为稳定期，混凝土温

度和环境温度趋于一致，应力慢慢稳定。

温度裂缝主要是由于温度梯度和应力差过大引起，内部温升过高会造成混凝土内部与表面、基础与上部结构之间存在较大的温差，产生约束应力；降温过程中收缩变形受到基层、相邻结构的约束，会产生拉应力。碾压混凝土虽然胶凝材料用量少，水化热总量比常规混凝土低，但是薄层连续施工、碾压密实度高的特点，使热量难以散出，施工节奏过快、层间间歇期过短时，热量就会不断积聚，增大温控难度。因此碾压混凝土温控要遵循“源头控温、过程降温、后期保温、动态监测”的原则，实现全周期温度控制。

2 碾压混凝土全过程温控措施

2.1 原材料优选与预处理温控

原材料是温控的源头，选用低水化热、性能稳定的原材料，可以从根本上降低水化热释放量，为温控打下基础。水泥选用中热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥，这两种水泥水化热释放速度慢、峰值低，可以有效地降低混凝土内部温升，防止热量短时间内集中释放。严禁使用早强型水泥，防止早期水化热过快释放造成温度急剧上升。

骨料是碾压混凝土的主要组成，占到70%以上，骨料温度影响混凝土出机温度和入仓温度。骨料选用级配连续、含泥量低的碎石和卵石，严格控制骨料的含水率和针片状颗粒含量，保证骨料密实度和拌合均匀性。施工前对骨料进行预处理，高温季节搭建遮阳棚遮挡骨料堆，避免阳光直射造成骨料温度过高，必要时用喷淋冷水降温，严禁骨料内有冰块或者积水，以免影响拌合料质量。低温季节要做好骨料的保温措施，防止骨料受冻，保证骨料的施工温度。

掺合料、外加剂属于改善温控效果的辅助材料，掺入优质

粉煤灰、矿渣粉等活性掺合料后,可代替一部分水泥,减少水泥用量,进而减小水化热总量,提升混凝土的和易性和密实性,延缓水化热释放速度。外加剂优先选择缓凝型高效减水剂,可以减少拌合用水量,提高混凝土强度,还可以延长混凝土凝结时间,分散水化热释放周期,防止水化热集中释放造成的温度峰值过高。

2.2 配合比优化设计

配合比设计属于温控的重要部分,要依照工程的设计强度,耐久性要求和施工环境,经由试验来确定最佳的配合比,既要考虑温控的需求,也要考虑施工性能。配合比优化坚持“低胶凝材料、低用水量、合理掺合料掺量、优化骨料级配”的准则,在保证设计强度及抗渗、抗冻等耐久性指标的基础上,尽量减小水泥的用量。

根据工程实践,碾压混凝土胶凝材料用量控制在合理的范围内,粉煤灰掺量可以根据施工季节、温控要求进行调整,高温季节适当提高粉煤灰掺量,从而减小水化热的释放。使用多级配骨料,增大粗骨料含量,减小砂浆用量,减少胶凝材料的总用量,提高混凝土的骨架结构,提高抗裂性。严格控制水胶比,水胶比过高会降低混凝土强度,增加收缩变形,过低会影响碾压密实度,通过试验确定最佳水胶比,保证混凝土拌合料具有良好的碾压性能,减少内部孔隙,提高热量传递效率。配合比确定之后不得随意变更,施工过程中根据原材料温度、环境温度的变化,对外加剂掺量和用水量进行微调,保证混凝土温控性能稳定。

2.3 施工阶段全过程温控管控

施工阶段是温控措施落实的关键时期,要从拌合、运输、入仓、碾压、层间施工等各个环节做好温度控制,严控混凝土入仓温度、浇筑层厚度和间歇期,防止热量积聚。

拌合环节严格控制出机温度,高温季节用冷水拌合,优先采用地下水或者制冷水,不得使用常温自来水直接拌合,必要时加入适量的片冰辅助降温,保证混凝土出机温度满足设计要求,一般控制在20摄氏度以下。低温季节采用热水拌合,提高混凝土出机温度,防止入仓后受冻,做好拌合设备保温防护。

运输环节缩短运输时间,选用密闭式运输车辆,高温季节车辆顶部加盖遮阳保温罩,减少运输过程中温度回升;低温季节做好车厢保温,防止混凝土热量散失过快。运输路线提前规划,避免中途停留,保证混凝土入仓后及时平仓碾压,减小温度损耗和热量积聚。

入仓、碾压阶段合理控制浇筑层厚,碾压混凝土一般浇筑层厚为30厘米左右,层厚过大容易造成内部热量不易散发,

过薄又会使施工层间结合困难。严格控制层间间歇期,间歇期过短会造成上层混凝土浇筑后,下层热量不能充分散出,形成热量叠加,一般间歇期控制在5~7天,高温季节适当延长间歇期,保证下层混凝土温度降到合理范围内再进行上层施工。平仓用平仓机均匀摊铺,防止骨料离析,碾压按先轻后重原则,用振动碾分层碾压,保证混凝土密实度达到要求,密实度不够会降低热量传递,造成内部温升。

通水冷却是大体积碾压混凝土温控的重要手段,对坝体等厚大结构提前预埋冷却水管,采用高压聚乙烯塑料水管,合理布置间距和层数,浇筑完成后立即通水冷却。通水温度控制在混凝土内部温差小于25摄氏度范围内,防止由于温度过高造成应力裂缝,根据内部温度监测数据调节通水量和通水时间,初期增大通水量加速热量散发,后期减小通水量,采用缓慢降温方式防止降温太快。

2.4 后期养护与保温防护

后期养护是防止表面裂缝的重要环节,碾压混凝土碾压后要及时进行保湿和保温养护,平衡内外温度梯度,减少表面水分蒸发和温度急剧变化。养护工作坚持“及时、持续、全覆盖”原则,用表面覆盖保湿土工布、保温棉毡等材料防止阳光直射、风吹雨淋造成表面温度迅速降低或者水分流失。

高温季节加强保湿养护,定时喷淋雾化水保持表面湿润,防止表面干燥收缩产生裂缝,同时采取遮阳措施降低表面温度和内部温差。低温季节加强保温防护,加厚保温覆盖层,必要时搭设保温棚,防止混凝土表面受冻,减小内外温差。拆模时间控制在混凝土强度达到要求且内部温度稳定之后进行,不得过早拆模,及时对表面进行覆盖保温。养护周期不小于28天,对重要的结构部位延长养护时间,保证混凝土性能的充分发挥,提高抗裂性。

2.5 温度实时监测与动态调控

为了达到温控的精确控制目的,必须创建起完备的温度实时监测系统,对混凝土内部温度、表面温度以及环境温度实施全程跟踪,并且及时调整温控手段。在混凝土内部不同部位、不同深度设置温度传感器,主要布设结构厚度较大、约束较强、容易开裂的部位,传感器布设间距适中,保证监测数据的全面、准确。

使用自动化温度监测设备实时采集温度数据,绘制温度变化曲线,主要对内部温升速率、温度峰值、内外温差和降温速率进行重点监测,控制指标为内外温差不大于25℃,降温速率每天不大于2℃。安排专人对监测数据进行分析并上报,一旦出现温差超标、温升过快等问题就马上启动应急调节措施,加大通水流量、加强表面保温、延长间歇期等来防止温度应

力超限而产生裂缝。施工完毕后,对混凝土的温度进行持续监测,得到完整的温控监测报告,给工程验收和以后类似工程提供数据参考。

3 温控措施实施效果分析

3.1 工程概况与温控实施背景

本次实践以贵州某水利枢纽碾压混凝土重力坝工程为依托,该工程最大坝高90m。防渗层为二级配碾压混凝土与变态混凝土组合,采用二级配富胶凝碾压混凝土C9025W8F100,面层采用二级配变态混凝土C2825W6F100,内部碾压混凝土采用C9015,总计碾压混凝土方量为41万m³,整体结构属于典型的大型混凝土结构,施工周期跨越了夏季高温和冬季低温两个时间段,昼夜温差和季节温差都比较大,温控防裂难度较高,对全过程温控措施的落实情况有很高的要求。工程施工前期,技术团队根据现场地质条件、气候环境和结构设计要求,采用多组室内配合比试验和现场工艺试验的方法来确定出适合本工程的低水化热配合比方案,在施工过程中全面落实原材料控制、施工过程温度控制、后期养护以及实时监测等全部措施,有针对性地应对各个季节的温控风险,全过程严格按照既定的温控标准进行施工。

3.2 温控核心指标监测结果分析

工程施工期间采用预埋的自动化温度传感器对混凝土内部温度、表面温度、环境温度进行实时监测,获取大量的实时监测数据并进行整理分析,主要温控指标均控制在设计的安全范围内。混凝土内部温度峰值稳定控制在35℃以内,没有出现水化热集中释放造成的温度骤升问题,混凝土内部和表面温差一直保持在22℃以下,远远小于25℃的安全控制标准,降

温阶段日均降温速率控制在1.5-2℃之间,降温过程平稳均匀,没有出现过快降温引起收缩应力骤增的情况。从温度变化曲线可知,混凝土温升平缓、降温稳定,没有出现温度突变、温差超标等异常现象,整个过程中温控参数都符合水利水电工程碾压混凝土施工规范的要求,证明了全过程温控措施具有很好的实时调控能力。

3.3 工程质量与防裂成效验证

工程主体施工完毕后,第三方检测机构对坝体碾压混凝土结构实施全方位的质量检测,检测内容包含混凝土密实度、抗压强度、抗渗性、抗冻性等主要指标,还要对结构表面和内部的裂缝展开排查。检测结果表明,混凝土的各项力学性能和耐久性指标均符合设计要求,碾压密实度达标率为100%,整体结构整体性好;全坝体范围内没有发现任何温度裂缝,结构厚度大的部位、基础约束部位、边角容易开裂部位都没有出现表面裂缝和深层裂缝,完全避免了水化热温差造成的裂缝病害。该实践结果表明,本文所提出的全过程温控措施体系可以很好地适应碾压混凝土施工的特点,从源头上消除水化热温控风险,具有很强的工程实用性以及推广价值。

4 结论

碾压混凝土温控是大体积混凝土结构施工的关键控制点,要抛弃单一类型养护的被动方式,创建起源头预控、过程监管、后期防护、动态监测的全面温控体系。原材料优选和配合比优化属于温控的基础部分,可以有效地减少水化热的产生,从源头上降低温升的风险,施工阶段的拌合、运输、入仓、碾压、通水冷却等环节的控制是控制温度梯度的关键,后期保温保湿养护可以平衡内外温差,防止表面裂缝,温度实时监测可以给动态调控提供数据支持,实现温控的精准化。

参考文献:

- [1] 田昊.碾压混凝土双曲拱坝施工温控技术及MgO混凝土筑坝技术应用研究[J].黑龙江水利科技,2026,54(02):143-146.
- [2] 许维华.面向碾压混凝土坝施工期的温控防裂技术研究[J].水利科技与经济,2025,31(11):132-137.
- [3] 邓思文.热带地区大坝碾压混凝土施工温控技术[J].价值工程,2025,44(31):132-134.
- [4] 孙昌茂,负小强,徐定辉,等.西北寒区碾压混凝土重力坝温控防裂研究[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版),1-10 [2026-03-22].