

混凝土配合比设计对大体积混凝土温度控制的重要性

杨丽娜

宁夏创元水利建筑工程质量检测有限公司 宁夏固原 756000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16383

[摘要] 合理的混凝土配合比设计是大体积混凝土温控中的核心因素。优化水胶比、骨料级配以及掺合料的种类和用量，能够显著降低水化热峰值并延缓其出现时间，从而有效控制温度裂缝的产生风险。本文围绕大体积混凝土温度控制问题，分析配合比设计在减缓水化热、提升结构耐久性等方面的重要作用，并提出若干优化措施，为工程实践提供参考依据。

[关键词] 混凝土配合比设计；大体积混凝土；温度控制；水化热；裂缝风险

引言：

大体积混凝土工程因其尺寸巨大、水化热集中释放等特点，极易在温度梯度作用下产生开裂风险。工程质量的保障依赖于施工技术，更取决于科学合理的材料设计。混凝土配合比作为结构耐久性与温度控制的关键环节，其重要性不容忽视。本文将以配合比设计为核心，剖析其在温度场调控、水化热削减及抗裂性能提升中的作用，旨在为相关工程提供理论指导与实践路径，激发更多对温控机制的研究关注。

一、大体积混凝土温控难点与裂缝机理分析

大体积混凝土因其结构尺寸庞大、整体浇筑量大，内部水化热不易及时散发，导致温度场分布极不均匀。在水泥水化过程中，大量放热会使混凝土核心温度迅速上升，而表层则受外界环境影响升温缓慢，从而形成较大的温差。当温差超过混凝土的允许极限时，就会引发结构内应力集中，进而导致温度裂缝的出现。这类裂缝影响结构的整体耐久性，也会降低混凝土的防渗、抗冻等性能。大体积混凝土结构因其体积庞大、水化热集中、施工周期长等特点，在水工建筑、桥梁墩台、城市轨道交通隧道及高层建筑基础等领域被广泛应用。由于内部温度梯度大，极易在硬化过程中产生温度裂缝。一旦裂缝形成，破坏结构整体性，还会造成渗漏、钢筋锈蚀等耐久性问题，严重时需采取化学灌浆、凿除重浇等复杂手段进行修复，维修成本高昂且施工难度大，甚至影响后期结构安全与使用功能。

从裂缝产生的机制来看，温度裂缝主要与水泥水化热释放引起的升温效应及其后的降温收缩有关。混凝土浇筑初期，核心区升温迅速且温度峰值高，若配合比设计不合理，易造

成水化热过度集中。而冷却过程中，混凝土内部与表层之间的降温速率存在显著差异，收缩应力得不到释放时，就会以裂缝的形式表达出来。加之大体积混凝土通常采用低水胶比与高胶凝材料掺量，进一步加剧了水化热积聚的强度。如果此时配合比中未充分考虑降温过程中的应力释放机制与材料弹性调节能力，结构就容易因约束应力超限而发生开裂。

控制温度裂缝的关键在于混凝土配合比的科学设计，选择合适的水胶比、矿物掺合料种类与掺量、骨料热惰性指标等措施，调节混凝土的整体水化放热规律。采用粉煤灰、矿渣粉等低放热矿物掺合料替代部分水泥，既可降低总水化热，又能延缓温度峰值出现时间，从而减缓内部温升速率；使用粒径分布合理、热容量大的粗骨料，也有助于吸收和缓释水化热。这些技术手段必须紧密结合工程实际工况进行优化，确保在温度控制时不牺牲混凝土的早期强度与后期耐久性，真正实现配合比设计对大体积混凝土温控性能的精细调控。

二、混凝土配合比设计在温度控制中的核心作用

混凝土配合比设计是大体积混凝土温度控制体系中的核心环节，其合理与否直接关系到水化热释放规律与结构内部温度梯度的变化。由于大体积混凝土在硬化初期处于绝热或半绝热状态，水泥水化热难以及时扩散，从而容易在内部积聚过多热量。经过科学的配合比设计，可以在源头上调节水泥用量、胶凝材料类型和掺合料比例，使混凝土的水化热峰值降低，并使温度变化过程更加平缓。适当控制水胶比能够调节混凝土拌合物的粘聚性与流动性，还能有效减缓水泥的水化反应速率，降低早期水化热释放速度，从而减少内部温度急剧上升的风险。温度峰值出现时间被延后，有助于结构

逐渐适应热胀冷缩变化,降低温差应力,显著减少温度裂缝的产生,提高混凝土整体耐久性与稳定性。

在实际工程中,配合比设计还可选用低水化热水泥、合理掺入粉煤灰、矿渣粉或硅灰等矿物掺合料,优化胶凝材料体系,从而有效调节水化放热曲线。这些掺合料具有活性填料功能,还能显著降低单位体积混凝土的总放热量,使得内部温度升高速率降低,避免早期因热量集中引发的结构应力过大。合理控制细骨料与粗骨料的级配,确保混凝土密实性和热传导性能,也有利于内外温度梯度的均衡,降低热应力集中区的开裂风险。调整砂率和最大骨料粒径,还可改善混凝土拌合物的工作性能与成型质量,间接增强其温控效果。

配合比设计是温控的技术手段,更是贯穿于混凝土整个服役周期的系统性决策。在考虑降温速率与裂缝敏感性的还需兼顾施工工艺的适应性、混凝土强度增长曲线以及早期与后期耐久性目标。部分工程中还需根据实际环境湿温条件对配合比进行定制化调整,实现对不同水化阶段温度行为的精准管控。地下连续墙、大体积筏板等结构中常采用二级或三级配合比优化策略,即在保持结构强度要求的前提下,阶段性调低水泥含量与热源集中度,有效打破温度峰值快速上升的路径。这种全周期、多维度的配合比设计理念,是实现大体积混凝土温控与抗裂目标协同控制的根本保障。

三、水化热调控策略与掺合料优化方案

水化热调控是大体积混凝土温控体系中的关键技术路径,而掺合料的优化配置则是其中最具调节灵活性和实际效果的核心手段。由于水泥水化过程中释放出大量热量,在大体积结构中极易形成温度梯度,导致内外温差拉大、应力集中,从而诱发温度裂缝。针对这一问题,调控策略需从热源生成机制出发,在原材料选型与反应过程干预上进行科学安排。科学控制水泥品种与用量,可选择低水化热水泥或混合材质水泥以减少热源强度,降低水化反应的剧烈程度。适当调整水胶比,有助于改善拌合物性能,还能延缓水化进程,减缓温升速率。结合优化的养护制度,如分阶段保温或控温养护等措施,可有效降低混凝土内部温度梯度,营造更为温和和均衡的水化环境,从根本上减少因温差引发的裂缝风险,保障结构的安全性和耐久性。

掺合料在降低水化热方面展现出显著优势,尤其是在替代部分水泥的情况下,减小了早期放热速率,还经过“二次反应”机制在后期提供强度补偿。其中,粉煤灰、矿渣粉和偏高岭土等材料因其潜在活性与热惰性特征,在温控配合比中被广泛应用。粉煤灰可延缓水化热峰值的出现时间,矿渣粉则经过玻璃体结构缓释反应热,两者协同作用可在保证工作性能的前提下显著降低水化热总量。在某些对早期温控要求极高的工程项目中,如核电基础、大体积设备基础或深埋隧道衬砌结构,常常会采用硅灰等粒径极细的高活性矿物材料。这类掺合料具有较强的火山灰反应性,能在早期迅速与水化生成物反应,填充毛细孔隙,显著提升混凝土的致密性与抗渗性能。其参与反应所释放的热量相对温和,有助于控制温升速度,从结构微观层面有效降低温度裂缝产生的概率,增强结构整体稳定性。

掺合料优化需考虑其物理化学性能,还需结合混凝土整体性能目标进行系统协调。在实际工程设计中,应根据水化热发展曲线对掺合料掺量、粒径分布与活性水平进行动态调整。在夏季高温环境下施工时,可适当提高粉煤灰掺量以抑制温升速率;在对早强要求较高的结构部位,则需平衡矿物掺合料的延迟效应与水泥早期强度之间的关系。考虑到不同批次原材料反应活性的波动性,常需经过绝热温升试验、差热分析等技术手段评估配合比对水化热的实际调控能力,确保其在复杂施工条件下仍具有稳定的温控效果。

四、工程案例分析:配合比调整对温控效果的影响

在大体积混凝土实际工程中,配合比调整对温度控制效果的影响具有直接且显著的体现。以某水利枢纽项目的地下结构为例,原设计采用高标号硅酸盐水泥与较低掺量的矿物掺合料,导致混凝土在浇筑后72小时内核心温度迅速上升至75℃以上,远超设计允许峰值温度差限值20℃的控制标准。结构内部出现明显的热裂纹,严重威胁了工程耐久性与服役安全。在问题暴露后,项目技术团队迅速开展混凝土温控原因分析与材料性能评估,并据此对原配合比进行了系统性的调整与优化。显著提高粉煤灰的掺量,减少高水化热水泥的使用量,选用粒径级配合理、比热容更高的粗骨料,使混凝土的热物理性能得到显著改善。调整后的混凝土在水化反应

过程中释放热量更为平缓,峰值温升降至 62°C 以内,显著缓解了内部温度应力集中趋势,成功实现了对温控目标的精准控制,为结构安全运行提供了保障。

在另一个大型轨道交通盾构区间底板项目中,面对地下连续施工和高约束条件带来的温控难题,技术团队尝试引入双掺技术,粉煤灰与矿渣粉复合掺入的方式调控水化热总量与释放曲线。试验段中采用的配合比将矿物掺合料总掺量提升至40%,在施工环境气温 30°C 以上的条件下,核心温升控制在 58°C 以内,并将温度峰值出现时间延后约18小时。监测结果显示,该方案下混凝土温度梯度稳定,表层与核心之间温差维持在 15°C 以内,裂缝控制效果显著优于原方案。此类案例充分说明,掺合料比例与类型的系统优化,可在不牺牲结构性能的前提下,有效实现温控目标。

工程实践表明,配合比设计的有效性不只依赖于单一参数的变化,而需要综合考虑水胶比、胶凝材料反应特性、骨料热惰性以及养护方式等多维因素。在某超高层建筑筏板基础浇筑工程中,项目技术人员利用大数据分析前期试验温升结果,动态优化配合比结构,配套使用低水化热水泥与预冷骨料,结合分层分段连续浇筑方案,实现了混凝土温度场的整体协调。温控系统监测数据显示,全浇筑周期内未出现超过控制限值的温差,结构未发生任何可视裂缝,为大体积混凝土温度裂缝控制提供了可复制的经验路径。这些案例再次验证了配合比设计在温控中的核心作用,其对水化热过程的调节能力是大体积混凝土工程能否顺利实施的关键保障。

五、基于温控目标的配合比设计建议与实施要点

在大体积混凝土的实际应用过程中,配合比设计应始终围绕温控目标展开,确保结构在水化热作用下的温度场可控、应力合理与裂缝风险可接受。温控目标涉及温度峰值的绝对控制,还涵盖温度梯度变化、升温与降温速率以及裂缝敏感期的时序匹配等多个维度。配合比设计需兼顾水泥用量、掺合料类型与掺量、水胶比、骨料热容量及界面结构等因素,实现温度与强度的动态平衡。在方案制定阶段,应结合热学模拟与实验数据,提前预估不同配比对温度分布的影响,为混凝土配合比参数设定提供理论基础。

配合比的设计建议包括多方面策略:在保证强度的情况

下,降低单位水泥用量是最直接的水化热控制措施,应优先考虑使用中低水化热水泥,并结合粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料复合掺入技术进行水泥替代。这可减少总热源释放,还可延长水化反应进程,平缓温升曲线,降低温差敏感性。在骨料选用方面,应优先选择粒径大、热惰性强的天然碎石,其较高的比热容有利于吸收并缓释水化热,避免温度集中。

在实施过程中,配合比设计还需与施工工艺、环境条件与监测系统相协同,形成闭环的温控管理机制。应在大体积结构浇筑前进行绝热温升试验,结合现场气温、湿度与养护条件建立动态修正机制。施工阶段可采用预冷骨料、降温拌水、分层浇筑与延迟养护等配合措施增强设计适应性。在裂缝控制敏感时段,应加强对混凝土温度及应力的实时监测,确保设计参数与现场表现一致,及时调整掺合料掺量或养护措施。这种基于温控目标的全过程配合比设计与实施策略,能有效降低结构温控风险,还能为工程后期耐久性和服役安全性提供强有力的技术保障。

结语:

本文围绕大体积混凝土的温度控制问题,系统阐述了混凝土配合比设计在降低水化热、减缓温升速率以及控制温度裂缝方面的重要作用。理论分析与工程案例相结合,明确了合理配合比设计在提升结构安全性和耐久性中的关键地位。基于温控目标提出的配合比调整策略及实施要点,为实际工程提供了技术参考与优化路径。未来应进一步结合智能温控技术,实现配合比设计的精准化与动态化管理。

[参考文献]

- [1]李强,周伟.大体积混凝土水化热控制技术研究[J].混凝土,2019,(10):85-88.
- [2]陈磊,王宏.矿物掺合料对大体积混凝土水化热影响分析[J].建筑材料学报,2020,23(3):45-50.
- [3]郑波,高峰.基于温控目标的大体积混凝土配合比优化研究[J].土木工程学报,2021,54(5):103-109.
- [4]吴刚,刘涛.大体积混凝土裂缝控制与温度场分析[J].工程建设,2022,40(6):62-66.
- [5]马宁,吕洋.掺合料对混凝土温控性能影响的实验研究[J].工程质量,2018,36(4):29-33.