高层建筑大体积混凝土温控防裂施工技术研究

李海斌[1]　王晓杰*[2]　徐　晓[3]
1. 上海天华建筑设计有限公司青岛市黄岛分公司　山东　青岛　266000
2. 上海天华建筑设计有限公司青岛分公司　山东　青岛　266000
3. 青岛市房屋使用安全服务中心　山东　青岛　266000

摘　要：高层建筑基础底板及转换层等大体积混凝土构件，因水泥水化热引起的温度应力是导致早期开裂的主要因素。本文从大体积混凝土温度裂缝的生成机理出发，系统分析了水化温升、内外温差和降温速率对开裂风险的影响规律，提出了基于“控温、降缩、增韧”三位一体的温控防裂技术体系。重点阐述了原材料优选与配合比优化、入模温度控制、分层分段浇筑、循环水冷却管布置及智能测温监控等关键施工技术，并探讨了施工缝设置、保温保湿养护等配套保障措施。研究认为，高层建筑大体积混凝土温控防裂的关键在于将温度场控制与收缩变形抑制有机结合，通过施工全过程的精细化温控管理，实现混凝土体积稳定性的有效提升。

关键词：高层建筑；大体积混凝土；温度裂缝；水化热；温控技术

引言

随着高层及超高层建筑的发展，2～5 米厚的大体积混凝土基础日益普遍。此类构件浇筑量巨大，且受复杂约束条件影响，水泥水化热引发的温度应力问题尤为突出。大体积混凝土在浇筑后 3～7 天为裂缝高发期。一旦开裂，不仅破坏结构整体性与防水性能，甚至可能贯穿截面，威胁建筑安全其难点在于温度场与应力场的强耦合：水化绝热温升可达 40～60℃，而早期抗拉强度增长缓慢，二者张力使开裂风险居高不下。此外，底板处于强约束状态，底部地基的摩擦嵌固产生外约束应力，内部温度梯度产生自约束应力，二者叠加进一步加剧开裂倾向。因此，将温度应力控制在混凝土早期抗拉强度允许范围内，是施工技术方案设计的核心命题。

1 大体积混凝土温度裂缝的生成机理与控制原理

1.1 温度裂缝的力学成因

大体积混凝土温度裂缝的本质是温度变形受到约束而产生的拉应力超过混凝土当时的极限抗拉强度。这一过程可分解为三个阶段。升温阶段，混凝土浇筑后水泥迅速水化放热，构件内部温度急剧上升，体积趋于膨胀，但受到地基和周边旧混凝土的约束，产生压缩变形和压应力——此阶段混凝土处于塑性状态，压应力通常不构成威胁。降温阶段，当水化热峰值过后，构件内部温度逐渐向环境温度回落，混凝土体积收缩，但地基和内部已硬化的芯部构成了约束条件，收缩受到阻碍，于是在构件表面和内部产生拉应力——此时混凝土的弹性模量快速增长而抗拉强度增长相对滞后，拉应力极易超过抗拉强度，形成温度裂缝。

1.2 温控防裂的技术逻辑框架

温控防裂的技术逻辑可概括为“降、匀、缓、抗”四个字。“降”即降低绝热温升，通过减少水泥用量和掺加矿物掺合料从根本上削减热源。“匀”即均匀温度场，通过分层浇筑和冷却水管使温度分布趋于均匀，减小内外温差。“缓”即减缓温度变化速率，通过保温养护延缓降温进程，使应力缓慢释放。“抗”即提高混凝土自身的抗裂能力，通过增韧材料和纤维增强提升极限拉伸值。四项措施协同作用，而非仅依赖某一单项技术，是温控成功的核心理念。

2 施工前的技术策划与配合比优化

2.1 大体积混凝土配合比设计原则

配合比设计应从降低水化热和减少收缩两个维度同时发力。首要原则是“双掺”技术路线——在满足设计强度等级的前提下，尽可能降低硅酸盐水泥用量，用粉煤灰和矿渣粉等矿物掺合料替代部分水泥。对于高层建筑基础底板，粉煤灰掺量可达胶凝材料总量的 20%～30%，矿渣粉掺量可达 15%～25%，这不仅能降低水化热 20%～35%，还能改善混凝土的后期强度和耐久性能[1]。水胶比宜控制在 0.38～0.45 之间，过高的水胶比增加干缩，过低则不利于水泥充分水化且增加自收缩。粗骨料的级配宜采用连续级配，最大粒径应根据钢筋间距和泵送条件合理确定，以降低浆体率和减少收缩。

2.2 低热水泥与矿物掺合料的选用

水泥品种对水化热的影响最为直接。大体积混凝土宜选用中低热硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥，其 3 天水化热分别不宜大于 240kJ/kg 和 280kJ/kg。当采用普通硅酸盐水泥时，应通过大掺量矿物掺合料的方式来平衡水化热。粉煤灰应选用 I 级或 II 级灰，其需水量比不大于 105%，以发挥减水增密的作用。矿渣粉宜选用 S95 级以上产品，其活性指数 7 天不低于 75%、28 天不低于 95%。复合掺用粉煤灰和矿渣粉可产生“叠加效应”，在降低水化热的同时优化混凝土的孔结构。

2.3 配合比验证与绝热温升估算

配合比初步确定后，应进行小规模试配和绝热温升估算。估算方法可采用经验公式或绝热温升试验设备实测。设计阶段应设定明确温控目标：混凝土最高温升不宜超过 60℃，入模温度与最高温升之和不宜超过 75℃。当估算值接近或超过目标值时，应进一步调整配合比或策划附加措施（如骨料预冷、掺加缓凝剂等）。所有试配数据应形成完整的试验报告，作为施工方案编制的技术依据。

3 混凝土浇筑阶段的温控施工技术

3.1 入模温度的精准控制

入模温度是影响最高温升的基础变量，每降低 1℃入模温度，可相应降低约 1℃的最高温度。控制入模温度应从原材料着手：骨料应设置遮阳棚，炎热季节可采用喷雾降温或水淋降温（含水率需精确控制）；水泥应避免刚出磨的热水泥，进场后静置降温不少于 7 天方可使用；拌合水可采用冰水替代常温水，必要时可添加片冰替代部分拌合水[2]。通过上述措施，夏季施工入模温度可控制在 30℃以下，冬季施工则不应低于 5℃，以防早期冻害。混凝土运输过程中，罐车宜加装保温套，减少运输途中的温度回升或散失。

3.2 分层分段浇筑的工艺设计

大体积混凝土的浇筑方式直接影响温度场的均匀性。“分层浇筑、薄层覆盖”是减小温差的基本工艺原则。每层浇筑厚度宜控制在 300～500 毫米之间，使下层混凝土的初期水化热在覆盖上层前得到一定程度散发，同时确保上下层之间在初凝前完成覆盖，避免形成冷缝。相邻层之间的浇筑间歇时间应通过热工计算确定，一般控制在 5～10 小时。对于平面尺寸超长的基础底板，应设置后浇带或诱导缝进行分段，每个施工段的长度不宜超过 40 米，以缩短散热路径、降低内外温差。

3.3 振捣密实与二次抹压工艺

振捣质量直接影响混凝土的密实度和抗拉性能。采用插入式振捣器，振捣点按梅花形均匀布置，间距不超过振捣有效半径的 1.5 倍（一般为 300～400 毫米），每点振捣时间以表面泛浆、无明显气泡逸出为准，宜为 15～30 秒。振捣过程中应避免振动棒触碰钢筋、预埋件和冷却水管。混凝土浇筑振捣完成后，在初凝前应进行二次抹压——用抹光机或人工铁抹将表面压平压实，消除因塑性沉降和早期失水产生的表面微裂纹，改善表层的密实性和抗裂性能。

3.4 循环水冷却管降温系统

对于厚度超过 2.5 米的基础底板，宜在混凝土内部布设循环水冷却管，主动导出水化热，降低内部最高温升。冷却管一般选用直径 25～50 毫米的焊接钢管或黑铁管，按水平间距 1.0～1.5 米、竖向排数根据厚度确定（每增加 1 米增设一排）的网格状布置。水管进水口和出水口分别引至构件外部，通入温度低于混凝土内部温度 10～15℃的循环水[3]。冷却水流量和通水时间应根据实时测温数据动态调整——初期（浇筑后 24～72 小时）全流量通水以削峰降温，后期逐步减小流量或间歇通水，防止降温速率过快。通水结束后应立即用高强度水泥浆或灌浆料对管道进行压力压浆封堵。

3.5 大体积混凝土的连续供应保障

大体积混凝土浇筑期间必须保证连续供应，避免因长时间间歇造成冷缝或形成薄弱界面。施工前应落实商品混凝土搅拌站的供应能力（通常需要不少于设计用量 1.2 倍的备供能力）、运输路线和备用搅拌站。现场配置足够的泵送设备，一般采用“一用一备”或“两用一备”的配置方案。浇筑过程中应建立通信联络机制，调度人员实时掌握搅拌站出料、运输途中和现场泵送的状态，确保供料节奏与浇筑速度匹配。因特殊原因必须间歇时，间歇时间不得超过混凝土的初凝时间（一般不超过 6 小时）。

4 混凝土养护阶段的温控与保湿技术

4.1 保温保湿养护的制度化执行

养护是大体积混凝土温控防裂的最后防线，也是最容易被忽视的环节。混凝土浇筑完成后应立即覆盖保湿保温材料——底面先铺一层不透水薄膜防止水分蒸发，上面覆盖保温被或草袋，厚度根据热工计算确定。养护的核心指标包括：混凝土表面温度与大气温度之差不宜大于 20℃，降温速率不超过 2℃/天。养护期间应安排专人定时检查覆盖层的完整性和湿润状态，防止风吹掀开或局部干燥。养护时间不得少于 14 天，对于掺加矿物掺合料的混凝土应延长至 21～28 天。

4.2 智能测温监控与动态调整

建立覆盖全断面的智能测温系统是实现精细温控的技术保障。测温点布置应遵循“面面俱到、重点加密”的原则——在构件平面的中心、边缘和转角部位分别布设测点，在厚度方向的上表面下 100 毫米、中心、下表面以上 100 毫米处设置三组温度传感器。采用自动化温度采集仪，监测频率在升温阶段每 1 ~ 2 小时记录一次，降温阶段可放宽至 4 ~ 6 小时。监测数据实时上传，自动生成温度-时间曲线和温差-时间曲线[4]。当温差或降温速率接近预警值时，系统自动报警并推送处置建议（如增加覆盖层厚度、调整冷却水流量等）。所有测温数据应完整存档，作为施工质量评价的依据。

4.3 养护方式的季节适应性调整

不同季节养护的重点和方式应有所差异。夏季高温季节，养护的首要任务是防止表面水分过快蒸发和内外温差过大。应在覆盖层上增设遮阳棚或喷雾装置，维持表面湿润；夜间温度较低时，应增加覆盖层厚度以减少表面散热。冬季低温季节，养护的重点是防冻和保温。应在混凝土中掺加防冻剂，覆盖层厚度应增加至夏期的 1.5 ~ 2 倍，必要时在覆盖层外侧增设防风帆布并采用电加热或蒸汽养护方式，确保混凝土在达到临界强度（一般不低于 5MPa）之前不受冻害。冬期养护期间应特别关注寒流突袭，提前准备应急增温物资。

5 裂缝预防的补充措施

5.1 合理设置施工缝与后浇带

对于超长、超厚的大体积混凝土结构，合理设置施工缝或后浇带是释放温度应力的有效构造措施。后浇带的位置应设置在结构应力较小的区段，一般间距为 30 ~ 40 米，带宽 800 ~ 1000 毫米。后浇带内的钢筋应连续贯通，但混凝土暂不浇筑，待两侧混凝土浇筑完成 60 天以上（或根据测温数据确认温度变形基本稳定后），再用比原标号高一级的微膨胀混凝土浇筑封闭。后浇带封闭应在环境温度较低的时段（宜为当地年平均气温季节）进行，以减少温差引起的附加应力。

5.2 抗裂纤维与膨胀剂的辅助应用

在温控措施之外，掺加辅助性抗裂材料可进一步提升混凝土的抗裂安全度。合成纤维（如聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维）以体积掺量 0.05% ~ 0.10% 加入混凝土中，可有效阻止塑性裂缝的扩展，提高混凝土的早期抗裂韧性，但对温度收缩裂缝的作用相对有限。膨胀剂（如 UEA 或 HEA 型）以 6% ~ 8% 的掺量替代部分水泥，可在水化过程中产生适度膨胀，补偿混凝土的部分收缩，但必须配合严格的潮湿养护才能发挥效果。以上措施应视为温控方案的补充而非替代，不应因使用了抗裂材料而放松温控标准。

6 结语

高层建筑大体积混凝土的温控防裂是一项涉及材料科学、热力学和施工工艺的系统工程。本文从温度裂缝的生成机理出发，构建了覆盖配合比优化、入模温度控制、分层浇筑工艺、循环水冷却、智能测温监控、保温保湿养护及后浇带设置的全流程温控防裂技术体系。研究的核心认识是：温控防裂的成败不取决于某一项“尖端技术”，而取决于施工全过程每一环节的精细管控——从原材料的每一批检验到浇筑时的每一层厚度，从养护覆盖的每一处边角到温度测点的每一组数据，环环相扣、缺一不可。高层建筑基础大体积混凝土施工的实践证明，只要科学地组织、严格地执行和动态地监控，温度裂缝是完全可以避免的。未来，随着低热胶凝材料、相变储能材料和智能化温度调控系统的不断发展，大体积混凝土温控防裂技术将向着更精准、更低碳、更智能的方向持续演进。

参考文献

[1] 王铁梦, 韩素芳, 杨嗣信. 大体积混凝土温度裂缝控制理论及工程实践 [J]. 建筑结构,2023,53(3):1-10.

[2] 刘加平, 田倩, 王育江. 现代混凝土收缩裂缝控制技术路线与工程应用 [J]. 中国工程科学,2024,26(1):78-87.

[3] 张君, 韩建国, 李志华. 高层建筑基础大体积混凝土配合比优化与温度场预测 [J]. 建筑材料学报,2025,28(1):56-64.

[4] 钱春香, 蔡瑞, 陈春. 矿物掺合料对混凝土水化热及温度场的影响规律 [J]. 硅酸盐通报,2023,42(8):2763-2772.