

高性能混凝土在高层建筑结构施工中的应用研究

杨贵兵

5130211969****6130

摘要:围绕高层建筑结构的承载需求与施工环境的扰动特性,探讨高性能混凝土在材料体系、工艺流程与质量管控中的协同路径。强调以工作性、强度增长、体积稳定与耐久性之间的平衡为核心,通过对象化的指标、窗口化的参数与闭环化的监测,实现从拌合到养护的连续受控。文章提出面向可泵性的流变设计、面向温控的成型策略与面向风险的预防思路,并构建由参数到流程的映射关系,用以指导配合比选择、设备能力配置与节奏安排。目标是在复杂场地条件下保持成品性能的一致性与结构安全的冗余度。

关键词:高性能混凝土;高层建筑;配合比;可泵性;抗裂

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.068

引言

高层建筑对材料与工艺的耦合提出更高要求,高性能混凝土因其在强度、耐久与体积稳定方面的综合表现,成为主体结构的关键材料。施工阶段常见泵送距离长、截面变化多、钢筋密集与温差显著等情形,任何环节失配都可能放大为后期缺陷。为了获得可复制的施工质量,需要以场景牵引的方法整合材料设计、设备能力与过程监测,使指标与操作要点形成一一对应。本文围绕性能需求映射、配合比与工艺协同、质量监测与风险控制三个方面展开纯理论探讨,提出从目标到参数再到流程的贯通逻辑,并给出面向现场的实施要点,以期为工程实践提供可遵循的路径。研究不涉及具体工程与数值,而是基于性能机理与工序逻辑给出具有普适性的要点清单,便于不同项目在统一框架下进行裁剪与迭代。为保持表达的纯净性,全文以中文术语展开,并尽量以确定性的语句描述可操作要点。

1 概念与性能需求映射

1.1 性能要素与指标架构

高性能混凝土的特征可归纳为工作性、强度与变形的匹配以及耐久与稳定的兼顾。工作性关注在给定剪切速率下的流动与保持时间,体现为坍落度损失的可控与黏聚保水的平衡。强度与变形的匹配指早期与后期承载路径的连续,既要满足拆模与传力的时间点,也要避免脆性上升。体积稳定强调水化收缩、温度伸缩与干湿循环的合成效应,目标是把自由变形压缩在可承受区间^[1]。耐久相关要素涉及孔隙结构、界面过渡区与侵蚀介质的作用方式,要求渗透阻力与微裂隙扩展速率保持低水平。

指标架构宜分为结果性与过程性两类。结果性指标

关注立方体强度、轴压性能、弹模与耐久等级,过程性指标关注坍落度、扩展度、静置保留时间与泵送压力波动。两类指标需要建立血缘关系,通过配比参数与施工参数的映射形成因果链条。为应对现场扰动,可设定参数窗口与容许带,将材料掺量、拌和含水、外加组分与运输时间纳入关联校核,使每一次浇筑都落在稳定区间。

为了把指标落到操作层面,还需建立对象与测点的关系网。对象包括配料站、运输单元、泵送单元与浇筑区段,测点包括坍落度复核点、压力记录点与温度观测点。通过时间与位置的双重标识,形成从材料批次到结构构件的证据链。证据链一旦建立,参数波动就能被定位到具体环节,从而实现针对性的调整与持续的改进。

在指标之间建立协调机制是体系的核心。工作性与强度常常存在此消彼长的矛盾,需要借助外加组分的分散与缓释作用来获得新的平衡点。体积稳定与耐久之间也存在取舍,过度降低水胶比可能带来早期收缩上升,因此应通过矿物细料与养护策略共同抑制。通过这类协调机制的系统化表达,设计人员与施工人员可以在同一坐标中讨论方案并快速达成一致。

1.2 高层结构的需求与约束

高层结构在竖向传力与侧向刚度方面具有鲜明特征,楼层高差与构件截面变化导致混凝土在输送与成型阶段承受更复杂的路径。钢筋密集区易形成局部卡塞与离析风险,剪力墙暗梁节点与核心筒部位尤为敏感。施工组织常见垂直运输距离长与天气变化剧烈两类扰动,易造成坍落度损失加快与出机温度偏高^[2]。为此需要在材料与工艺侧同步设计,使可泵性与抗离析性能在长路径下仍能保持一致。

需求与约束可以分为三个方面。一方面是承载需求

对强度与弹模的下限约束，需要在龄期内按计划达到传力节点的可用状态，并在长期服役中维持足够的刚度与延性。另一方面是成型需求对流动、黏聚与保水的复合要求，需要在钢筋间隙与角隅部位保持连续致密，避免出现麻面与不密实。再一方面是体积稳定对温控与约束条件的共同作用，需要在约束边界内减小温差与收缩梯度，使应力集中不至于转化为裂缝。

把三方面转换为参数目标，就得到从材料到工序的协同清单。工作性目标对应坍落度与扩展度的范围，强度目标对应水胶比与胶凝材料体系的范围，稳定性目标对应出机温度与养护环境的范围。清单进入计划阶段后，便可据此配置设备能力与节奏安排，使供料、运输、泵送与振捣的节拍形成协调关系。

围绕约束与需求的耦合，还需要把施工节奏与楼层节拍统一表达。高差越大，输送与成型之间的时间差越容易扩大，工作性下降的风险越高。通过在计划中预设缓冲时段与应急节拍，减少偶发干扰对连续性的冲击。对于钢筋极为密集的节点，则应在模板、振捣与布料三项上作出配套安排，使材料特性与空间条件达成匹配。

2 配置设计与施工工艺协同

2.1 配合比设计与可泵性控制

配合比设计的出发点在于以目标性能为约束确定骨料级配、胶凝材料体系与外加组分的协同。骨料级配应追求致密填充与最小浆体需求，减少粘度负担并提高体积稳定。胶凝材料的设计要兼顾早期发展与后期耐久，通过矿物细料优化孔隙结构与界面过渡区，降低渗透通道的形成概率。外加组分围绕分散、保水与缓释调节工作性演化，以减缓长距离与等待环节中的流变劣化，使到达浇筑点时仍具备足够的可塑性与黏聚度^[3]。

可泵性控制需要从泵送阻力、压力波动与管道润滑三个方面统筹。减小阻力依赖粒径分布与浆体黏度的平衡，压力波动与离析倾向可通过黏聚度与保水性的组合抑制。管道润滑层的形成与保持决定启动稳定性与持续稳定性，宜采用稳定的浆体配方与合适的充管节奏，并结合停机再启的专门规则减少冲击。为应对温湿与运输时间的波动，应预设坍落度损失曲线并在出机口与浇筑点设置复核点，采用微量调整与短时再搅拌的边界规则维持目标窗口，使现场调节有据可依。

当结构高度提升到一定范围，泵送系统的压力级别与管径选择会影响能耗与稳定。应在可承受的能耗范围内优先保证稳定性，通过折中管线长度与弯头数量降低附加阻力，并在高差位置设置检修与观测节点。这样既

能降低异常停机概率，也便于在出现波动时快速定位与恢复。

当目标性能被明确后，参数寻优可以采取分步与联动两种路径。分步路径先确定骨料架构，再在水胶比与外加组分之间寻找平衡，联动路径则以流变曲线与强度增长曲线同时为约束，在更大的参数空间内寻找稳定解。两种路径各有侧重，但都需要在试配与现场复核之间建立快速迭代通道，使实验室结论能够被现场验证并在短周期内完成修订。

2.2 成型与养护的温控抗裂策略

成型阶段的关键矛盾是形状复杂与体量较大带来的温差与收缩集中。模板体系与支撑刚度影响截面约束，振捣方式与布料节奏影响气泡排出与骨料分布。宜按分区分层的策略布置浇筑节奏，保持相邻区段的时间间隔在可衔接范围内，减少冷缝生成风险。对高耸部位应结合竖向施工缝位置与施工段长度，使表层与深层实现同步密实，界面连续且强度增长协调^[4]。

温控与抗裂策略可围绕三个抓手展开。一方面是源头控制，把出机温度与入模温度纳入交底事项，通过遮阳降温与供水温度控制降低初始热量，并合理安排夜间与清晨作业以规避峰值天气。另一方面是过程缓释，借助保温覆盖与分阶段拆模减小温度梯度与收缩梯度，同时配合二次抹面与早期表层封闭降低微裂扩展。再一方面是后期稳态，通过持续保湿与表层养护剂维持水化环境，降低自收缩与干缩的叠加效应，并在关键龄期设置应变与位移观测以便及时调整养护强度。

抗裂效果还取决于约束释放的安排。可在长向或宽向设置缩缝与弱化带，使不可避免的体积变化在可控位置释放。同时控制拆模与载荷转换的时机，避免在高梯度阶段引入刚性约束。只要把温控、养护与约束释放三项安排形成联动，裂缝风险就能被压缩到可接受水平。

对于受风与日照影响显著的高层外立面，应特别关注表层水分蒸发速度与内外温差的叠加效应。可采用遮挡与雾化保湿等手段降低表层蒸发速率，并以分段覆盖的方式兼顾作业便利与温控效果。对于厚板与大体量构件，应在养护期内维持温度缓降与湿度缓变，避免出现急剧转折。只要温度与湿度的时间曲线保持平滑，裂缝萌生的驱动力就会明显降低。

3 质量监测与风险控制

3.1 过程监测要点与参数窗口

质量管控的核心在于将关键参数与工序活动建立可追溯关系。拌和环节记录材料批次与含水变化，运输

环节记录时长与环境状态，泵送环节记录压力曲线与停机时段，成型环节记录振捣能量与层厚，养护环节记录温湿与持续时间。通过参数窗口的设定可把异常波动提前暴露到看板上，并以分级告警的方式引导现场处置，使偏差在早期被消除。

过程监测应聚焦工作性演化、温度场演化与体积变形三个维度。工作性演化可通过坍落度与扩展度的配对复核进行跟踪，温度场演化可通过埋设测点与表面测点的组合获取梯度，体积变形可通过表面位移与构件应变的联合观测判断趋势。多源数据以时间戳与位置坐标对齐，形成从材料到构件的证据链，为事中调整与事后评估提供依据。

为了提升数据的可解释性，宜在看板上同时呈现趋势与稳定性，用滑动窗口展示波动区间，用控制图展示超越界限的频次，并将处置记录与下一次观测结果关联。这样一来，管理层能够发现瓶颈，作业层能够把握节奏，技术人员能够评估参数对结果的影响强弱，从而让每一次改进都能留下可复用的经验。

监测网络的稳定性同样关键。应在关键位置设置冗余测点，并在数据链路上设计容错策略，确保在局部故障与短时中断情况下仍能保留足够的证据。对人工记录与设备上报实行双通道校核，使异常能够被及时识别。把处置结果回写到数据资产中，便于后续的模式识别吸收真实样本，提升告警的准确度与可解释度。

在信息表达上，应坚持同一口径。把配合比参数、设备参数与环境参数归入统一数据字典，使不同岗位在同一术语下沟通。把时间与空间作为组织维度，把批次与构件作为实体维度，在此基础上进行趋势判读与因果研判。这样既便于跨班组协同，也便于跨阶段回溯，为质量验证与争议裁决提供依据。

3.2 缺陷预防与修复思路

缺陷预防的原则是把风险源头前移并将处置节点前移。针对离析与泌水风险，控制砂率与浆体黏度并在布料口设置转向缓冲以降低粒子分层，配合连续均匀的振捣以实现完整密实。针对冷缝风险，通过连续作业与合理的搭接时间维持新老界面的化学与物理结合，并在表层进行二次处理以提高界面完整。针对收缩开裂风险，通过温控曲线与养护曲线的配合降低梯度，并在敏感区采用约束释放措施使应力分散。

修复安排强调施工过程中的即时与短期手段。对早期表层裂纹可采取压实修补与表层封闭，对局部麻面与蜂窝可采用浅层凿除与再浇筑的组合，对因温差导致的

贯通隐患应通过监测延长观察周期并实施延迟修复。修复完成后把材料与工艺参数回写到知识库，作为下一阶段配合比与工序调整的依据，并将成效纳入评估，促使组织在重复场景中获得更稳定的结果。

在组织层面，需将缺陷预防与修复纳入绩效考核与交付清单。通过明确责任边界与响应时限，减少等待与反复，通过复盘与标准更新，将高频问题转化为操作要点，通过培训与现场示范，使班组对关键细节形成共同认知，从源头降低缺陷发生的概率。

复合缺陷往往源于多因素叠加。预防时需要识别相互强化的因素组合，例如高温与长时间等待与高钢筋率的共同出现会显著放大风险。通过对因素组合的识别与分级预案的准备，现场可以在早期进行节奏重排与资源倾斜，使潜在问题被化解在过程之中。

对已发生的缺陷，应在修复后进行复测并建立对照记录，以确认措施的有效性。对于难以在短期内确认结果的隐患，则通过延长观察与阶段性复核的方式降低不确定性。把每一条经验沉淀为可检索的条目，随着工程推进逐步形成适配本项目的操作指南，在后续阶段获得更高的稳定性与效率。

4 结语

在高层建筑的场景下，高性能混凝土的应用价值体现在性能与工艺的同频与流程与监测的互证。以目标性能为牵引的配合比设计与以可泵性为基准的施工组织相互支撑，以温控与抗裂为主线的成型与养护彼此配合，以参数窗口与告警分级为抓手的监测闭环持续收敛。只要把对象、指标与流程的关系稳定表达，把不确定性的来源逐步纳入可控区间，就能在复杂条件下获得一致的成品质量与可靠的结构安全冗余。当材料与工艺的匹配被制度化表达并由数据资产长期维护，组织能够在不同项目中快速迁移经验与能力，形成稳定的质量优势。

参考文献

- [1] 陆宏德. 高性能混凝土在高层建筑施工中的应用与性能优化研究[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(04): 57-59.
- [2] 肖从真, 李建辉, 朱爱萍, 等. 高强高性能混凝土在高层建筑结构应用技术研究[J]. 建设科技, 2018, (16): 16-19. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2018.16.001.
- [3] 赵永龙. 高层建筑全机制砂高性能混凝土制备及泵送施工技术要点[J]. 上海建材, 2025, (03): 85-87+95.
- [4] 杨艳平, 黄晖皓. 高性能再生混凝土在高层建筑结构中的应用[J]. 上海建设科技, 2017, (02): 63-65+71.