 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i10.12070

Research on Concrete High-Height Pumping Construction Techniques for Super-Tall Buildings

Yunhua Yang

Wuhan Bohong Construction Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430050, China

Abstract

With the acceleration of China's urbanization process, super-high-rise buildings have become the primary means for the intensive spatial utilization of urban core areas; as their heights continue to break records, this trend poses significant challenges to vertical transportation construction technologies. Concrete super-high-rise pumping, as a core construction process for the main structural works of super-high-rise buildings, has a direct impact on project schedule, structural quality, and construction safety. In view of this, this paper conducts an in-depth analysis from four dimensions—technical challenges, material optimization, equipment selection, and process control—to establish a comprehensive super-high-rise pumping construction technology framework. This framework holds important practical value for enhancing the construction efficiency of super-high-rise buildings and ensuring the quality of their structural works.

Keywords

super high-rise buildings; ultra-high concrete pumping; mix proportion optimization; pipeline design; construction control

超高层建筑混凝土超高泵送施工技术研究

杨云华

武汉博宏建设集团有限公司，中国·湖北 武汉 430050

摘要

随着我国城市化进程的加速，超高层建筑已成为城市核心区空间集约利用的主要载体，建筑高度不断突破的同时，也对垂直运输施工技术提出了严苛挑战。混凝土超高泵送作为超高层主体结构施工的核心工序，其技术水平直接决定工程进度、结构质量与施工安全。基于此，本文从技术难点、材料优化、设备选型、工艺控制四个维度展开深入分析，构建完整的超高泵送施工技术体系，对提升超高层建筑施工效率、保障结构工程质量具有重要的工程应用价值。

关键词

超高层建筑；混凝土超高泵送；配合比优化；管路设计；施工控制

1 引言

近年来，我国超高层建筑建设规模持续扩大，高度300m以上的地标性建筑在多个城市落地。超高层主体结构以钢筋混凝土核心筒+外框钢结构为主要体系，核心筒混凝土需通过垂直泵送方式输送至数百米高空，泵送高度从百米级向五百米甚至六百米级跨越，施工难度呈非线性增长。混凝土超高泵送并非简单的设备能力叠加，而是涉及材料科学、流体力学、机械工程与施工管理的交叉技术体系，因此，深入研究超高层建筑混凝土超高泵送施工技术具有重要意义。

2 超高层建筑混凝土超高泵送的核心技术难点

随着超高层建筑竖向高度不断刷新纪录，混凝土超高泵送技术已成为制约主体结构施工效率与结构成型质量的核心环节。不同于常规高度的混凝土输送，超高层泵送过程中，混凝土需在高压、长距离、复杂管路环境下完成垂直提升，材料性能、设备承载力、施工管控与安全保障均面临远超常规工况的严苛考验。单一环节的性能衰减或管控疏漏，都可能引发堵管、设备过载甚至高空安全事故。下文从材料工作性变化、压力传递与设备极限、性能经时损失、管路损耗与施工安全四个维度，对超高泵送的核心技术难点展开具体分析。

2.1 高压环境下混凝土工作性劣化

超高泵送过程中，混凝土在管路内承受数十兆帕的输送压力，高压作用会迫使混凝土中的自由水向骨料间隙渗透，导致浆体黏度下降、骨料摩擦力上升，即“压力泌水”现象。当泵送高度超过200m后，压力泌水率会随高度增加而快速上升，若混凝土保水性不足，极易出现骨料与砂浆分离，在管路弯头、变径处形成堆积，最终引发堵管。同时，高压环境会使混凝土中的引气气泡破裂，含气量下降，进一步劣化混凝

【作者简介】杨云华（1987-），男，中国湖北松滋人，硕士，高级工程师，从事建筑结构研究。

土的流动性与可泵性。

2.2 垂直输送的压力损失与设备负荷极限

混凝土泵送压力需克服沿程阻力、局部阻力与垂直料柱自重三部分损耗。沿程阻力与管路长度、管壁粗糙度正相关，局部阻力集中在弯头、三通、变径管位置，而垂直段料柱自重随高度线性增加，是超高泵送最主要的压力来源。以C60强度等级混凝土为例，每提升100m垂直高度，自重产生的压力约为2.4~2.6MPa，若泵送高度达500m，仅自重压力就超过12MPa，叠加管路阻力后，泵口出口压力需达到20MPa以上，已接近常规泵送设备的性能极限，对设备密封系统、液压系统可靠性要求极高。

2.3 长距离输送的坍落度经时损失

超高层泵送施工中，混凝土从搅拌站出料到泵送入模，通常需经历运输、等待、泵送三个阶段，总时长可达1.5~2h。高温环境下，水泥水化速率加快，外加剂减水效果衰减，混凝土坍落度会出现显著损失，若入泵坍落度不足，泵送阻力将急剧上升。此外，长管路输送过程中，砂浆与管壁的黏附作用会使混凝土内部浆体占比下降，也会间接导致流动性降低，增加堵管概率。

3 高性能泵送混凝土原材料与配合比优化

混凝土可泵性是超高泵送技术的核心基础，可泵性优良的混凝土应具备大流动性、良好保塑性、低泌水率、适宜黏度与抗离析能力，需通过原材料优选与配合比精细化设计实现。

3.1 原材料质量控制

胶凝材料建议采用“水泥+矿物掺合料”的二元或三元复配方案。水泥选P·O42.5级及以上的普通硅酸盐水泥，初凝时间要≧150min，还要保证和后续外加剂的适配性达标。矿物掺合料优先配I级粉煤灰加S95级粒化高炉矿渣粉：粉煤灰用来改善浆体流动性、增强保水性，矿渣粉主要提混凝土的中后期强度，顺带优化浆体的颗粒级配；两样掺合料一起用，不仅能省下不少水泥用量，水化热能降下来，坍落度损失也能得到缓解。

粗骨料用连续级配碎石，针片状颗粒占比不能超10%，含泥量压到1.0%以下。骨料最大粒径得匹配输送管径，一般不超过管径的三分之一，超高泵送的时候，建议控制在20到25mm。细骨料就用中砂，细度模数卡在2.4~2.8，含泥量不超2.0%；细砂、特细砂坚决不能用，容易把混凝土黏度抬得异常高。

3.2 配合比设计原则

超高泵送混凝土的配合比设计，得兼顾强度、泵送性能和体积稳定性，核心按“低水胶比、富浆体、优级配、缓凝保塑”的思路来调配。

水胶比跟着混凝土强度等级定，C50到C80的高强混凝土，一般把数值控制在0.28~0.38之间。水胶比压太低的话，混凝土黏度过大，泵送起来阻力会明显变大；数值放太高又容易出现离析、泌水问题，都会影响正常施工。胶凝材料总用量卡在450~550kg/m³，得保证有足够的浆体量充分包裹住骨料，正常情况下浆体体积占比最好不低于35%。

配合比确定后，必须进行高压泌水试验、坍落度经时损失试验与泵送模拟试验，验证1h、2h坍落度保留值与扩展度指标。通常要求入泵坍落度≧200mm，扩展度≧500mm，倒锥法流出时间15~30s，2h坍落度损失≦30mm，压力泌水率≦40%，方可满足超高泵送要求[2]。

4 泵送设备选型与输送管路系统设计

4.1 泵送设备选型

超高压混凝土输送泵是超高泵送施工的核心装备，具体选型不能只盯着单一参数，要结合最大泵送高度、混凝土强度等级和实际输送量综合敲定。

设备的核心性能指标是最大出口压力与理论输送量。泵送高度在200~300米的工况，常规选配出口压力16~20MPa的超高压拖泵就能满足需求；泵送高度达到300~500米时，就得换用出口压力22~28MPa的重型超高压泵；一旦泵送高度超过500米，单台泵的压力储备通常不够用，多采用双泵串联接力的泵送方案，在中间避难层设置中继泵，分级分担泵送压力，避免单台设备长期满负荷运行。

4.2 输送管路设计与布置

输送管路系统承担着压力传递的核心功能，其设计方案的合理程度，直接关系到泵送作业的运行效率与施工安全。

在管径选型方面，管路内径与沿程阻力呈负相关，但管径过大会提升管体自重压力，同时增加混凝土骨料沉降的风险。针对超高泵送工况，主干管路推荐选用DN125规格输送管；若输送细石混凝土，可适配DN100型管路；施工全过程中严禁随意缩小管路内径、中途变径。

管路布置需遵循多项原则：垂直管路优先沿核心筒电梯井道或结构柱侧边布设，通过预埋埋件与主体结构形成可靠固定，每间隔2至3层设置一道固定支架，以此消解管路运行振动与轴向反作用力；水平管段长度不宜过短，通常需不小于垂直输送高度的1/3，用于抵消垂直料柱产生的反压；管路整体走向应尽量顺直，尽可能减少弯头数量，优先选用曲率半径不小于1000mm的大半径弯头，以此降低局部阻力损耗；

泵机出口位置需设置缓冲弯管与截止阀，避免停泵阶段混凝土发生倒流。

5 超高泵送关键施工工艺与过程控制

5.1 泵送前准备工作

正式开泵前，得先做完设备调试和管路排查：检查泵机液压、密封两套系统的运行状态，校定好压力表精度；管路逐段过一遍，确认接头密封严实、支架固定牢固，磨损超标的管段直接换掉。

润管是防堵管的关键工序，先泵送清水浸湿管路内壁，再换 1:2 的水泥砂浆润滑管壁，砂浆用量跟着管路总长度来定，每百米管路大概备 0.5m³ 就够。润管全程保持低压低速送料，等砂浆从管路末端顺畅流出后，才能转入正式混凝土泵送。千万别直接用水泥净浆润管，免得浆体被稀释，引发混凝土离析。

5.2 泵送过程工艺控制

泵送初期采用低压低速档位，待管路内混凝土形成连续料流后，逐步提升泵送压力与速度。正常泵送时保持匀速连续作业，避免频繁启停，每次停泵时间不宜超过15min，若停泵时间较长，应每隔5~10min开泵反泵1~2次，防止混凝土在管内沉降凝结。

施工过程中需严格管控混凝土进场质量，每车检测坍落度与扩展度，对工作性不达标、出现离析的混凝土坚决退场，严禁现场随意加水。夏季高温施工时，对骨料采取遮阳降温措施，搅拌用水采用冰水，降低混凝土入模温度；冬季施工时对管路采取保温包裹措施，防止混凝土受冻[3]。

5.3 堵管预防与应急处理

堵管多发生在弯头、锥管与管路末端，预防措施包括：优化混凝土配合比、保证连续供料、避免管路急转弯、控制粗骨料最大粒径。一旦发生堵管，立即停泵，通过压力表判断堵管位置，采用“反泵+正泵”交替方式尝试疏通，若无效则分段拆管清理。拆管前必须先泄压，确认管内无残余压力后方可拆卸，防止高压混凝土喷出伤人。疏通后重新接管，需先润管再恢复泵送。

5.4 管路清洗与收尾

当日泵送结束后，及时清洗输送管路。超高泵送优先采用水洗法，从泵机端注入清水，推动海绵球与清洁球沿管路行进，将管内混凝土顶出。水洗过程中控制水压，末端设置防护挡板，防止海绵球高速弹出伤人。严禁采用气吹法清洗超高压长管路，避免安全事故。

6 施工质量与安全管控要点

6.1 质量管控措施

建立“原材料-配合比-生产-运输-泵送-入模”全链条质量追溯体系。搅拌站严格按照审定配合比生产，准确计量外加剂掺量；运输过程中罐体保持低速转动，防止离析；现场设置专职试验员检测入泵混凝土工作性，留存标准养护试块与同条件试块。

泵送成型后的混凝土按规范要求振捣密实，核心筒墙体、柱体采用分层浇筑、分层振捣，避免漏振过振；浇筑完成后及时覆盖养护，高强混凝土养护时间不少于14d，防止收缩开裂。

6.2 安全管控要点

超高压泵送属于高风险作业，需制定专项安全方案。泵机操作人员持证上岗，严格执行操作规程；管路安装完成后进行水压试压试验，试验压力不小于最大工作压力的1.2倍，确认无渗漏后方可投入使用；高空管路支架定期巡检，发现松动、变形及时加固。

作业面设置警戒区域，拆管、洗管时下方禁止人员通行；泵机周边设置隔音防护，降低噪声污染。夏季高温作业做好设备降温与人员防暑，冬季做好设备防冻与防滑措施[4]。

7 结论

超高层建筑混凝土超高泵送是一项系统性工程，其技术核心在于“材料是基础、设备是保障、工艺是关键、管控是根本”。通过优选原材料、优化配合比制备高可泵性混凝土，匹配高性能超高压泵送设备与合理的管路系统，辅以精细化的施工过程控制与完善的质量安全管理体系，可有效破解超高泵送的技术难题，实现数百米高度混凝土的高效、安全、稳定输送。

参考文献

[1] 成良民,李磊,柯伟席,等.超高性能混凝土泵送施工可行性研究[J].四川建材,2024,50(5):76-78.

[2] 王贵禄,陈尚伟,何信周,等.C120超高泵送机制砂自密实混凝土研制[J].建筑技术,2024,55(3):354-358.

[3] 王泽平.高强高性能机制砂混凝土配比与超高泵送试验研究[J].砖瓦,2023,(10):60-62+66.

[4] 高立军,张逸飞.超高层高强度混凝土泵送的综合施工技术研究[J].江西建材,2021,(10):248-249.