Breakthrough of Key Process Difficulties in Ultra-high Performance Concrete Production

Hongqiang Wu

Hefei Product Quality Supervision and Inspection Institute, Hefei, Anhui, 234000, China

Abstract

As a representative of the new generation of building materials, ultra-high performance concrete provides a new solution for modern engineering construction due to its excellent mechanical properties and durability. The production process of ultra-high performance concrete is complex, and it faces many technical problems in raw material selection, mixing and dispersion, forming and curing, which restricts its large-scale application. Based on the analysis of the practical significance of ultra-high performance concrete process breakthrough, this paper deeply analyzes the key process difficulties existing in the current production, and puts forward a systematic breakthrough strategy from the aspects of multi-material collaborative optimization, efficient mixing intelligent control, and whole process quality control, so as to provide theoretical reference and practical guidance for promoting the industrialization development of ultra-high performance concrete.

Keywords

ultra-high performance concrete ; production process ; technical difficulties ; breakthrough strategy

超高性能混凝土生产关键工艺难点突破

武洪强

合肥产品质量监督检验研究院，中国·安徽 合肥 234000

摘　要

超高性能混凝土作为新一代建筑材料的代表，其卓越的力学性能和耐久性能为现代工程建设提供了全新的解决方案。超高性能混凝土的生产工艺复杂，在原材料选配、搅拌分散、成型养护等环节面临诸多技术难题，制约了其规模化应用。本文在分析超高性能混凝土工艺突破现实意义的基础上，深入剖析了当前生产中存在的关键工艺难点，并从多元材料协同优化、高效搅拌智能控制、全流程质量管控等方面提出了系统性的突破策略，以期为推动超高性能混凝土产业化发展提供理论参考和实践指导。

关键词

超高性能混凝土；生产工艺；技术难点；突破策略

1 引言

随着现代建筑工程向着超高层、大跨度、极端环境方向发展，传统混凝土材料已经不能满足越来越严格的要求。超高性能混凝土因为具有超高强度、优异的韧性和很好的耐久性而成为支撑重大工程的重要材料。但是，超高性能混凝土的生产工艺与普通混凝土有着本质的区别，其低水胶比、高胶凝材料用量、纤维增强等特点给生产工艺带来了前所未有的挑战。目前原材料选配的精准度不高、搅拌时纤维分散不均、成型养护工艺不稳定等问题，严重制约了超高性能混凝土的规模化生产及工程应用。因此深入研究生产工艺中的主要难点，找到行之有效的突破策略，对超高性能混凝土产业的高质量发展具有重大的理论价值和现实意义。

【作者简介】武洪强（1980–），男，中国安徽宿州人，本科，工程师。

2 超高性能混凝土工艺突破的现实意义

2.1 推动建筑材料领域技术革新

超高性能混凝土代表着混凝土材料发展的最高水平，工艺上的突破将会给建筑材料领域带来深刻变革。传统混凝土材料在强度、韧性、耐久性等各方面存在着固有的局限性，不能满足现代工程对材料性能的极致要求。超高性能混凝土依靠颠覆性的配合比设计和创新的工艺技术，使材料性能实现质的飞跃，为建筑材料科学开拓出新的研究领域。工艺技术的突破不但是超高性能混凝土自身发展完善的重要推动力，也可以带动原材料加工、外加剂研发、生产设备制造等上下游产业的协同创新，形成完整的技术创新链条。从宏观上看，超高性能混凝土工艺的成熟将会改变建筑材料技术范式，使建筑材料行业从经验为主走向科学为主，推动建筑材

料行业高质量发展 [1]。

2.2 满足重大工程建设高性能需求

当代重大工程对于材料的性能有着史无前例的要求，而超高压混凝土工艺突破就是满足这些要求的必经之路。超高层建筑要承受巨大的竖向荷载和水平风荷载，对材料的抗压强度和整体刚度要求非常高；大跨度桥梁结构既要轻质高强又要抗裂，海洋工程、核电设施等极端环境下的结构要耐腐蚀、寿命长。超高性能混凝土由于具有综合性能优势，可以很好地应对上述工程难题，但是前提是必须突破生产工艺的技术瓶颈，实现稳定可靠的批量化生产。工艺技术成熟以后，超高性能混凝土就会从实验室走向工程现场，为港珠澳大桥、川藏铁路等国家重大工程提供坚实的材料保障，支撑我国基础设施建设迈向更高的水平 [2]。

2.3 促进绿色低碳可持续发展

在碳达峰、碳中和目标的引领下，建筑材料行业要完成绿色转型这一艰巨的任务，超高性能混凝土工艺的突破将会给行业的低碳发展带来新的动力。超高性能混凝土虽然单位体积的胶凝材料用量大，但是由于其超高强度，在满足相同的承载力要求时，结构截面可以大幅减小，材料总用量明显降低，从而实现全生命周期的碳减排效益。更值得注意的是，超高性能混凝土较好的耐久性可以延长结构使用寿命、减少维修修复、拆除重建次数，从源头上节约资源、降低环境负荷。工艺技术的突破还会促进工业废渣、尾矿等固体废物的高值化利用，实现固废资源化和材料高性能化相互配合。由此可见，超高性能混凝土工艺突破不但是技术上的进步，也是践行绿色发展理念、推动行业可持续发展的重要举措 [3]。

3 超高性能混凝土生产中存在的关键工艺难点

3.1 原材料选配与配合比优化难题

超高性能混凝土对原材料品质要求十分严格，原材料选配和配合比优化成了制约其生产的首要难题。与普通混凝土不同，超高性能混凝土采用极低的水胶比和多元胶凝材料体系，水泥、硅灰、粉煤灰、矿渣等原材料粒度分布、活性指标、化学成分有严格要求。不同产地、不同批次的原材料性能有波动，造成配合比不能实现标准化复制。超高性能混凝土需要加入多种外加剂来调节工作性能，但是外加剂之间、外加剂与胶凝材料之间存在复杂的相容性问题，配合比调整的试错成本很高。颗粒级配的优化设计更对传统的经验方法提出挑战，要在纳米尺度到毫米尺度实现密实堆积，而目前现有的理论模型不能准确地预测实际的性能。这些因素互相交织，使配合比优化成为一个系统性的难题 [4]。

3.2 搅拌工艺与纤维均匀分散性控制挑战

搅拌工艺是超高性能混凝土生产的关键工序，纤维均匀分散是搅拌工艺面临的主要难题。超高性能混凝土的低水胶比决定了它的初始状态非常黏稠，需要较长的搅拌时间才能达到理想的流动性。搅拌过程中，钢纤维或者有机纤维容易产生团聚、缠绕，形成纤维球，严重影响材料的力学性能以及工作性能。纤维分散效果与搅拌设备类型、转速有关，也与投料顺序、搅拌时间、温度环境等有关，需要精细的工艺控制。传统的搅拌设备和工艺不能满足超高性能混凝土的生产要求，搅拌能耗高、效率低、均匀性差等问题普遍存在。另外搅拌过程中物料的实时监测手段缺乏，工艺参数的调节主要依靠人工经验，不能达到精确控制，批次间质量波动难以避免 [5]。

3.3 成型养护工艺与质量稳定性瓶颈

成型养护是超高性能混凝土性能实现的重要环节，目前成型养护工艺的质量稳定性存在明显缺陷。超高性能混凝土的水胶比较低，因此对于水分散失很敏感，在成型过程中稍有不慎就会造成表面开裂和内部缺陷。振捣密实是保证材料性能的重要措施，但是过度振捣会造成纤维定向排列和浆体离析，影响材料的各向同性。养护制度对超高性能混凝土性能的发挥起着决定性的作用，常规养护无法完全发挥其潜在强度，而蒸汽养护、热水养护等特殊养护方式所用的温度、湿度、时间等参数必须精确控制。现场施工条件复杂，理想养护条件很难保证，昼夜温差、环境湿度等变化都会对材料性能造成影响。更突出的是目前缺少超高性能混凝土的系统质量检测标准和控制体系，产品质量的稳定性不能得到保证，影响了其在重要工程中的大规模应用。

4 超高性能混凝土关键工艺难点突破策略

4.1 多元材料协同优化与精准配比技术

解决原材料选配难题的关键就是创建多元材料协同优化体系，完成配合比的精准设计和动态调节。首先应该建立原材料性能数据库，对不同产地、不同批次的原材料的物理化学性能参数进行系统的收集，包括粒度分布曲线、比表面积、活性指数、化学组成等主要指标，给配合比设计提供全面的数据支持。其次，采用改进型 Andreasen 颗粒堆积理论和分子动力学模拟技术，从微观尺度优化颗粒级配，计算不同粒径组分的体积分数和空间分布，从而达到纳米级硅灰和毫米级骨料的最佳匹配，使基体密实度达到最大。在此基础上，采用响应面法和人工神经网络算法，建立原材料性能波动与配合比调整的非线性关系模型，开发基于云计算的智能配比调整系统，根据原材料实时检测结果自动调节水胶比、砂胶比、外加剂掺量等关键参数，实现配合比自适应优化。同时深入研究聚羧酸系减水剂与多元胶凝材料体系的相容性机理，分析外加剂分子结构与吸附行为的内在联系，建立基于分子设计的外加剂优选准则，从根本上解决外加剂适应性问题，大大减少试配工作量。另外还要联合上游原材料生产企业，推进硅灰、石英粉等关键原材料生产的标准化、专业化，创建原材料质量认证体系，从源头上提高原材料品质的批次稳定性。经过上述多层次、系统化的措施综合使用之

后，能够有效地解决配合比优化这个主要问题，为超高性能混凝土稳定批量化生产打下良好的技术基础。

4.2 高效搅拌工艺与分散均匀性智能控制

解决搅拌工艺难题要从设备创新和智能控制两个方面入手，形成高效精确的搅拌工艺体系。从设备角度出发，根据计算流体力学仿真分析结果，研制适合超高性能混凝土的专用搅拌设备，改进搅拌叶片的几何形状、安装角度和运动轨迹，在搅拌筒内形成多层次的剪切流场和对流循环，提高搅拌效率和物料均匀性。参照化工行业高剪切混合的成功经验，将转子定子式高速分散装置和行星式低速混合系统结合起来，通过高速剪切来打散纤维团聚体，再在低速混合下实现纤维的三维随机分布。从设备上有效破解纤维团聚的顽疾。从工艺角度出发，应根据物料流变特性演变规律，对投料顺序、搅拌程序进行系统优化，采用干粉预混、浆体预分散、纤维后掺等分步投料工艺，配合变速搅拌程序，在不同阶段施加适宜的剪切作用，改善纤维与基体的界面结合。更重要的是建立搅拌过程的数字孪生系统，利用主轴功率实时监测、扭矩频谱分析、机器视觉图像识别等多源感知手段，建立物料状态的在线表征模型，实现搅拌均匀度的定量评价。在此基础上，采用深度强化学习算法建立工艺参数和产品性能的端到端预测模型，根据物料状态反馈信号动态调整转速、时间等控制变量，实现搅拌工艺的闭环自适应优化。除此之外，还要重视搅拌环境温度的精确控制，根据超高性能混凝土水化放热集中的特性，设置搅拌筒冷却系统和原材料预冷装置，将物料温度控制在合适范围内，避免温度过高造成工作性能变差、凝结时间异常。

4.3 成型养护工艺优化与全流程质量管控体系

突破成型养护瓶颈要依靠工艺精细化和质量管控系统化双轮驱动，创建起全流程的质量保证体系。成型工艺应根据构件的几何形状及性能要求选择最合适的成型方式，对薄壁构件、复杂形状构件重点开发触变性可调的自密实超高性能混凝土配方，通过优化黏度改性剂和稳定剂的复配方案，实现浇筑时高流动、静置后不离析的理想状态，从根本上减少对机械振捣的依赖。对必须振捣的部位，应根据离散元数值模拟结果来制定精细的振捣规程，确定振动频率、振幅、持续时间、插入深度、移动间距等主要参数的最佳组合，建立振捣能量和密实度的定量关系，既保证气泡充分排出，又防止过振造成纤维沉降、定向排列。并且使用真空辅助成型技术，在浇筑完成后加负压环境来加速气泡的迁移和排出，消除毫米级以下微观孔隙缺陷，进一步提高基体致密性。在养护工艺上，要创建起依照水化动力学模型的分阶段智能养护制度，早期阶段采取薄膜覆盖加喷雾保湿的办法，保证表面相对湿度不低于临界值，防止塑性收缩裂缝的出现，中期按照强度发展目标，挑选标准养护、蒸汽养护或者热水浸泡等加快养护方案，对蒸汽养护工艺，要依照延迟钙矾石生成风险评价结果，细致把控静停时间、升温速率、恒温温度、恒温时间、降温速率这五个重要参数，保证胶凝材料活性被充分激发的同时，防止热损伤。在质量控制方面，应参照国际先进标准建立三级质量控制体系，即原材料进场检验、生产过程监控、成品出厂检测，制定超高性能混凝土专用质量验收标准和试验方法，完善抗压强度、弯拉强度、弹性模量、抗渗性、抗冻性等关键性能指标的检测规程。

5 结语

超高性能混凝土属于建筑材料领域的一项重大革新成果，它的产业化应用对推进工程建设高质量发展有着十分重要的意义。目前，原材料选配、搅拌分散、成型养护等主要工艺环节还存在很多难题，限制了超高性能混凝土的规模化生产。本文从推动技术革新、满足工程需求、促进绿色发展三个方面论述工艺突破的现实意义，对配合比优化、纤维分散、质量稳定性等技术难点做了详细的分析，提出了多元材料协同优化、高效搅拌智能控制、全流程质量管控等突破策略。

参考文献

[1] 张涛.搅拌工艺对超高性能混凝土力学性能的影响[J].价值工程,2025,44(25):132-134.

[2] 成鑫磊,穆锐,刘晓英.超高性能混凝土的制备及力学性能研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(12):4295-4312.

[3] 耿春雷,董阳,左然芳,巩思宇,张栋.超高性能混凝土研究及工程应用现状[J].混凝土世界,2023,(12):74-79.

[4] 冯元,吴赤球,吕伟,刘康宁,尹天一,刘雪,付诗媛,余睿.超高性能混凝土设计理论与磷石膏高质利用研究进展[J].混凝土与水泥制品,2024,(01):1-8.

[5] 陈景镇,王洋,吕凯芳,刘晨凯,黄楚煌,饶邦政.装配式超高性能混凝土幕墙安装工艺研究[J].绿色建造与智能建筑,2023,(08):30-33+45.