

UHPC 技术创新与工程应用的中国方案

关键词：超高性能混凝土、材料创新、规模应用

超高性能混凝土(UHPC)作为一种革命性建筑材料,凭借其卓越的力学性能和出色的耐久性,已成为近年来工程材料领域的重要创新。UHPC 能够有效满足现代工程对结构轻量化、长寿命和高可靠性的严苛要求,在桥梁、风电、海洋工程等多个领域展现出广阔的应用前景。

中国 UHPC 的研究与产业化起步于 20 世纪 90 年代,经历了从研究探索期(1990—2010 年)、工程试点期(2010—2020 年)到目前的规模化应用期(2020 至今)的发展历程。特别是在 2023 年以来,在国家“双碳”战略和新型基础设施建设的推动下,中国 UHPC 产业进入了高速发展阶段。在政策环境方面,中国相关部门积极推动 UHPC 技术发展。中国混凝土与水泥制品协会(CCPA)已初步建立了 UHPC 团体标准体系,如 2018 年发布了《超高性能混凝土基本性能与试验方法》,2020 年发布了《超高性能混凝土预混料》,2021 年发布了《超高性能混凝土预制构件生产技术要求》和《超高性能混凝土现场浇筑施工技术要求》,并于 2022 年发布了《超高性能混凝土结构设计技术要求》。此外,还有多个行业和地方标准,如《公路桥梁超高性能混凝土加固技术指南》《无腹筋预应力超高性能混凝土梁桥技术规范》,以及正在编制的《超高性能混凝土幕墙工程技术规范》等。这些标准的建立和完善,为 UHPC 行业发展提供了系统的标准化指引,突破了 UHPC 结构设计的瓶颈,铺平了其应用发展之路。同时,UHPC 作为先进工程材料被纳入“十四五”规划中的重点发展领域,多地政府也出台了针对性的推广政策,加速其在重大工程中的应用落地。

中国 UHPC 技术发展已形成从基础研究到工程应用的全链条创新体系,在材料设计、制备工艺和施工技术方面取得了显著突破。中国工程院发布的《2024 年度全球工程前沿报告》将“超高性能混凝土材料低碳化及性能调控”列为土木、水利与建筑工程领域的十大工程研究前沿之一,显示了中国在 UHPC 领域的国际影响力。统计数据显示,2018—2023 年,中国 UHPC 核心论文数量和被引频次均表现突出。在专利领域,中国 UHPC 相关专利占全球的 38%,位居世界第一。在成本方面,国产 UHPC 价格也已大幅下降,并已出口到“一带一路”沿线国家,显著降低了其应用门槛。这使得 UHPC 在能够有效发挥其力学性能的场所,相比传统钢筋混凝土和钢结构,能够显著节材减碳,甚至可能不增加或降低总造价。

UHPC 的工程应用高度依赖高效、精准的施工工艺。近年来,中国在装备智能化和工艺创新方面取得了多项突破。例如,南京长江五桥项目,建造了适合 UHPC 拌制、输送、布料、振捣和整平的设备与生产线,显著提高了 UHPC 构件生产的自动化水平、生产效率和质量控制能力。在桥梁维护加固方面,厦门大桥桥墩采用了 5 cm 厚的 UHPC 进行加固和保护,利用其高耐久性,大幅度延长了桥梁的使用寿命。武汉三环线部分桥梁也采用 UHPC 对腹板和底板进行维修加固。此外,在广州地铁项目和福建隧道工程中,喷射 UHPC 技术成功应用于基坑支护,提高了施工安全性和结构耐久性。中国还在发展 UHPC 预制装配快速维修新技术,

并成功应用于城市高架桥 BRT 站台的抢修，实现了快速高效修复。在风电领域，已将 UHPC 应用于风电混塔，并于 2023 年 10 月建成了世界第一个 UHPC-钢风电混塔(风机轮毂中心高度 180 m)，之后不断刷新高度纪录。这项技术使塔筒在 180 m 高度仍保持优异的动态稳定性，有效解决了传统塔架结构运行可靠性难题。

中国 UHPC 产业已进入规模应用引领与技术创新驱动并重的发展新阶段。在桥梁工程中，钢-UHPC 复合桥面已得到广泛应用，截至 2018 年 11 月，已在中国 60 余座钢桥上铺装，面积超过百万平方米，有效解决了钢桥面铺装寿命短和钢结构易疲劳损伤两大难题，已进入规模化、可持续应用阶段，处于世界领先地位。英德北江四桥和中山西环的 105 m 跨径 UHPC 筒支箱梁桥，已多次突破 UHPC 筒支梁桥跨径的世界纪录，并形成了设计、施工、验收的成套技术和成果。南京长江五桥作为迄今世界上 UHPC 用量最大的桥梁工程，UHPC 总用量达 11670 m²，显示了中国在 UHPC 大规模工程应用方面的能力。在建筑领域，UHPC 幕墙和外立面装饰构件的应用快速增长，如余杭文化艺术中心成为中国最大的 UHPC 建筑应用项目，幕墙总面积达 20000 m²，实现了高效高质量的预制生产。故宫东华门主出入口的过梁更换为预应力 UHPC 梁，体现了 UHPC 在古建筑维修维护中的重要应用。上海大歌剧院采用了悬挑 UHPC“中国扇”，这是 UHPC 梁板在国内首次被用作大规模建筑结构的独立受力构件，展现出结构创新与文化艺术的完美交融。此外，UHPC 在管廊隔仓板、重载路面、永久(免拆)模板、高强轻质电杆以及抗冲磨水工结构等领域也取得了成功应用。UHPC 的高度密实和低孔隙率特性有助于减少有害物质的渗透和扩散，从而保护环境和生态系统，其在制备过程中掺入工业废弃物也实现了资源的循环利用。

未来五年是中国 UHPC 产业化的关键窗口期，需要着力突破材料成本瓶颈，完善场景化技术标准，构建绿色低碳生产体系。通过材料-设计-施工全链条协同创新，UHPC 将有力支撑中国新型基础设施建设和“双碳”目标的实现，为全球工程材料变革贡献中国方案。

思政点：中国方案，绿色低碳发展理念，突破科技壁垒