

低碳混凝土的技术路径及应用障碍

杨 鹏

云南交投公建工程养护有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 在全球应对气候变化、实现“双碳”（碳达峰、碳中和）目标的大背景下，建筑行业作为全球二氧化碳排放的主要来源之一，亟需进行深度脱碳。混凝土作为全球使用最广泛的建筑材料，其生产过程中的高碳排放问题尤为突出。本文系统梳理了低碳混凝土的核心技术路径，包括替代胶凝材料、新型低碳水泥、碳捕集与利用（CCU）、再生骨料应用、优化配合比设计以及数字化智能调控等方向；深入分析了当前在政策法规、经济成本、技术成熟度、标准体系、市场接受度及产业链协同等方面存在的主要应用障碍；最后，提出了推动低碳混凝土规模化应用的综合策略建议。研究表明，实现混凝土行业的深度脱碳需要多维度协同推进，既要强化技术创新，也要完善制度保障和市场机制，构建绿色低碳建材生态体系。

关键词: 低碳混凝土；碳减排；替代胶凝材料；碳捕集利用；应用障碍

引言

混凝土是人类历史上使用最广泛的人造材料，其年产量超过300亿吨，支撑着全球基础设施建设与城市发展。然而，混凝土的环境代价不容忽视。据国际能源署（IEA）统计，全球水泥生产每年排放约26亿吨二氧化碳，占全球人为CO₂排放总量的7%~8%，若将整个混凝土产业链纳入考量，其碳足迹更为庞大。其中，约60%的排放源于石灰石煅烧的化学反应（ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ），其余40%则来自燃料燃烧和电力消耗。随着《巴黎协定》的深入推进以及中国“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”战略目标的确立，建筑建材行业面临前所未有的减排压力。混凝土作为核心建材，其低碳化转型已成为实现国家“双碳”目标的关键环节。在此背景下，“低碳混凝土”应运而生——指在全生命周期内碳排放显著低于传统混凝土的新型混凝土体系。然而，尽管技术路径日益多元，其大规模商业化应用仍面临多重障碍。

1 低碳混凝土的核心技术路径

实现混凝土低碳化并非单一技术突破所能达成，而是需要从原材料、生产工艺、配合比设计到施工运维的全链条创新。目前，主流技术路径主要包括以下六类：

1.1 替代胶凝材料（SCMs）的应用

替代胶凝材料是现阶段最成熟且广泛应用的减碳手段。粉煤灰、粒化高炉矿渣、硅灰等工业副产品因其火山灰活性或潜在水硬性，可部分取代高碳排的硅酸盐水泥熟料。例如，矿渣粉掺量达50%以上时，混凝土碳排放可降低30%~40%，同时提升后期强度与耐久性；粉煤灰则在改善工作性和抑制碱骨料反应方面具有优势^[1]。然而，SCMs的地域分布不均、质量波动大，以及高掺量下

早期强度发展缓慢等问题，限制了其在快硬或严寒地区工程中的应用。此外，随着火电和钢铁产能调整，优质SCMs供应趋紧，长期可持续性面临挑战。

1.2 新型低碳水泥的研发

为突破传统水泥体系的碳排瓶颈，硫铝酸盐水泥、碳酸盐煅烧粘土水泥（LC³）及地质聚合物等新型胶凝体系被积极研发。LC³通过将石灰石与煅烧粘土复合，可将熟料用量降至50%以下，减碳约40%，已在部分国家开展试点。地质聚合物以粉煤灰或矿渣为基材，在碱性激发下形成无钙胶凝体，理论上可减少60%~80%碳排放。但其强碱性激发剂成本高、腐蚀性强，且缺乏配套设计规范，工程应用仍处探索阶段。总体而言，新型水泥虽具颠覆潜力，但受限于工艺成熟度、标准缺失及产业链适配性，短期内难以替代主流产品。

1.3 碳捕集、利用与封存（CCUS）

针对水泥窑尾气中高浓度CO₂，碳捕集与利用（CCU）成为重要补充路径。其中，碳养护技术最具工程可行性：在混凝土搅拌或预制构件养护阶段注入CO₂，使其与水化产物反应生成稳定的碳酸钙，实现永久固碳。每立方米混凝土可固碳5~20 kg，同时提升早期强度与密实度。CarbonCure等技术已在全球数百家搅拌站部署。然而，该技术依赖稳定CO₂气源、专用注入设备及工艺改造，初期投资较高，且与现浇混凝土施工节奏匹配度有限，规模化推广仍需降低成本并优化集成方案。

1.4 再生骨料与循环利用

利用建筑废弃物制备再生骨料，可减少天然砂石开采及其运输碳排放。合理使用再生粗骨料（替代率30%~100%）可使混凝土全生命周期碳足迹降低10%~20%。但

再生骨料因附着旧砂浆、孔隙率高、吸水性强,易导致新拌混凝土工作性差、强度离散、界面薄弱。虽可通过碳化预处理、纳米涂层等手段改善性能,但成本增加且缺乏统一质量标准。目前再生骨料多用于非结构部位,其在承重结构中的安全应用仍需长期性能数据支撑和规范修订。

1.5 配合比优化与高性能化

“少用即低碳”理念推动配合比精细化设计。通过高效减水剂降低水胶比,在保证强度前提下减少水泥用量;发展超高性能混凝土(UHPC)或高强混凝土,以更小截面实现相同承载力,间接降低材料总耗量。结合生命周期评价(LCA)方法,可量化不同设计方案的碳排放,引导从“强度导向”转向“性能-碳排双控”设计范式^[2]。此类策略无需新材料投入,实施门槛低,是当前最具性价比的减碳路径之一。

1.6 数字化与智能调控

数字技术正赋能低碳混凝土精准管理。BIM与数字孪生支持结构轻量化设计,减少冗余混凝土;AI算法可基于历史数据预测配合比性能,推荐最优低碳方案;智能搅拌站则能实时采集原材料碳数据,动态调整配比并生成碳排放报告。未来,通过构建覆盖设计、生产、施工的数字化平台,有望实现碳流透明化、决策智能化与责任可追溯,为低碳混凝土规模化应用提供系统性支撑。

2 低碳混凝土的应用障碍分析

尽管技术路径清晰,但低碳混凝土在工程实践中推广缓慢,主要受制于以下障碍:

2.1 政策与标准体系滞后

当前,低碳混凝土推广的最大制度性障碍在于政策激励不足与标准体系滞后。多数国家尚未建立针对建材产品的强制性碳排放限额或碳标签制度,导致企业缺乏主动减排的外部压力与内在动力。即便部分企业投入研发低碳产品,也因无法获得政策认可或市场溢价而难以为继。与此同时,现行混凝土结构与施工规范(如中国的GB 50010、美国的ACI 318)主要基于传统硅酸盐水泥体系构建,对替代胶凝材料的掺量设限严格,对新型胶凝体系(如地质聚合物)甚至完全未予考虑。这种“规范锁定”效应使得工程师即使有意采用低碳技术,也因合规风险而却步。此外,全国范围内缺乏统一的低碳混凝土认证标准与标识体系,导致绿色产品难以被识别,消费者无法通过市场选择表达环保偏好,进一步削弱了创新积极性。

2.2 经济成本与市场机制不健全

经济因素是制约低碳混凝土商业化的直接原因。一

方面,多数低碳技术仍处于产业化初期,设备投资大、原材料成本高。例如,碳养护系统需额外配置CO₂储运与注入装置,地质聚合物依赖昂贵的碱激发剂,再生骨料需经过多道强化处理,这些都导致低碳混凝土单价普遍高于传统产品10%至30%。另一方面,碳排放的负外部性尚未通过碳税、碳交易等市场机制内部化,传统高碳混凝土的“真实成本”被低估,而低碳产品的环境溢价无法在价格竞争中得到补偿。在当前以低价中标为主导的工程招投标模式下,业主和承包商自然倾向于选择成本更低的传统方案^[3]。加之低碳建材供应链尚不成熟,SCMs供应不稳定、再生骨料质量参差、新型水泥产能有限,进一步放大了市场风险,抑制了规模化采购意愿。

2.3 技术成熟度与性能疑虑

工程界对新材料的审慎态度源于对结构安全的极端重视。许多低碳混凝土技术虽在实验室表现良好,但缺乏长期服役性能数据支撑。例如,高掺量粉煤灰混凝土在50年尺度下的碳化深度、氯离子渗透速率、冻融循环后的强度衰减等关键指标,尚无足够工程案例验证。地质聚合物在潮湿环境下的体积稳定性、与钢筋的相容性等问题也存在争议。这种“数据真空”使得结构工程师在设计重要公共建筑或基础设施时,宁愿沿用熟悉但高碳的传统材料,也不愿承担“首用风险”。此外,部分低碳混凝土的施工性能与现有工艺不匹配,如凝结时间过长影响模板周转,工作性敏感增加现场控制难度,这些都会引发施工单位的抵触情绪,进一步阻碍技术落地。

2.4 行业惯性与认知偏差

建筑行业具有高度路径依赖特征,从设计、施工到监管,整个体系长期围绕传统材料构建,形成了稳固的技术惯性和认知框架。结构工程师习惯于使用OPC体系的强度-龄期关系、弹性模量、徐变系数等参数进行计算,对新材料的本构模型缺乏掌握;施工单位则担心新材料影响施工进度与验收通过率,缺乏相应的操作培训与技术支持;而业主方在项目决策中往往过度关注初始建造成本,忽视全生命周期的环境与经济效益。这种多方主体的认知偏差与利益错位,使得低碳混凝土即便技术可行、政策鼓励,也难以在实际项目中落地生根。更深层看,行业文化中对“创新”的容忍度不足,对“失败”的惩罚过重,也抑制了先行先试的积极性。

2.5 产业链协同不足

低碳混凝土的推广本质上是一项系统工程,涉及原材料供应商、水泥厂、外加剂企业、搅拌站、设计院、施工单位、检测机构及政府监管部门等多个主体。然而,当前产业链条割裂严重,信息流、物流、资金流与

碳流未能有效协同。上游原材料的碳足迹数据无法准确传递至下游设计与施工环节,导致绿色设计缺乏数据支撑;碳减排责任在产业链中边界模糊,各方推诿观望;产学研用脱节,高校研究成果难以转化为工程可用的技术包。缺乏一个强有力的协调机制或平台型企业来整合资源、制定规则、分担风险,使得低碳混凝土的推广陷入“人人都说好,但没人敢先用”的困境。

3 推动低碳混凝土发展的对策建议

为破解上述障碍,需构建“技术—政策—市场—文化”四位一体的推进体系:

3.1 完善政策法规与标准体系

政府应加快建立强制性建材碳排放管理制度,率先在政府投资工程中推行低碳混凝土强制使用比例,并逐步扩展至全社会。同步修订混凝土相关设计、施工与验收规范,基于科学评估放宽对SCMs掺量的限制,设立新型低碳胶凝材料的“绿色通道”审批机制。同时,加快制定《低碳混凝土评价标准》及认证标识体系,使绿色产品可识别、可比较、可追溯,为市场选择提供依据。

3.2 健全经济激励与市场机制

应将水泥行业全面纳入全国碳市场,并提高有偿配额比例,使碳成本真实反映在产品价格中。对采用低碳混凝土的项目给予容积率奖励、绿色信贷贴息、增值税即征即退等政策支持。推动公共采购优先选用认证低碳建材,形成示范效应^[4]。探索建立“绿色溢价”补偿机制,如通过碳信用交易让低碳混凝土生产商获得额外收益。

3.3 加强技术研发与工程验证

设立国家级低碳建材重点研发专项,集中攻关CCU效率提升、地质聚合物耐久性改善、再生骨料强化等关键技术。建设覆盖不同气候区的长期性能监测网络,积累真实服役数据。遴选一批标志性基础设施项目开展低碳混凝土集成应用示范,编制技术指南与典型案例库,消除工程界疑虑。

3.4 构建绿色供应链与数字平台

推动建立全国统一的建材碳足迹数据库,要求主要生产企业披露产品EPD(环境产品声明)。鼓励发展“混凝土即服务”模式,由专业供应商负责从设计、生产到碳管理的全过程。利用区块链技术确保碳数据不可篡改,增强可信度,为碳金融产品开发奠定基础。

3.5 提升行业认知与能力建设

将低碳混凝土知识纳入注册结构工程师、建造师继续教育必修内容。组织行业协会开展技术培训、现场观摩与标准宣贯。通过媒体宣传、公众开放日等形式,提升社会对绿色建材的认知与认同,营造支持创新的良好氛围。

4 结语

低碳混凝土是建筑行业实现“双碳”目标不可或缺的技术载体。当前,以替代胶凝材料、新型水泥、碳捕集利用、再生骨料等为代表的技术路径已初步形成,具备显著的减碳潜力。然而,其规模化应用仍受制于政策滞后、成本劣势、技术不确定性、行业惯性及产业链割裂等多重障碍。未来,推动低碳混凝土发展不能仅依赖技术单点突破,而需构建系统性解决方案:一方面,通过政策引导与市场机制创造有利外部环境;另一方面,持续提升技术成熟度与工程可靠性,并加强全链条协同与能力建设。唯有如此,才能真正实现混凝土从“灰色材料”向“绿色基石”的历史性转变,为全球气候治理与可持续发展作出实质性贡献。

参考文献

- [1]刘硕,关彬.低碳混凝土技术研究与应用综述[J].混凝土与水泥制品,2025,(03):86-89+93.
- [2]黎姝洵,顾晓燕,廖晨雅.低碳混凝土的技术路径及应用障碍[J].四川建材,2025,51(03):38-41.
- [3]孙建友,姜其波,孙传洋.低碳混凝土在绿色建筑中的应用及碳足迹评估[J].居舍,2025,(21):43-45.
- [4]张红.低碳混凝土:城市更新的绿色筋骨[J].混凝土世界,2025,(06):12-15.