

钢筋混凝土结构建筑建材的碳排放影响因素研究

赵亮

新疆鼎天力商品混凝土有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 随着全球气候变暖加剧,建筑行业碳排放问题备受关注。钢筋混凝土结构作为主流建筑形式,其碳排放受多因素影响。研究表明,建材生产(尤其是水泥与钢材)及运输是碳排放重点阶段,结构设计优化、施工工艺改进、能源结构调整、材料回收利用等措施可显著降低碳排放。本文通过构建全生命周期模型,量化各阶段碳排放强度,为制定差异化减排策略提供科学依据。

关键词: 钢筋混凝土结构; 建筑建材; 碳排放; 影响因素

引言: 在全球积极应对气候变化、大力推进碳中和目标的大背景下,建筑行业的碳排放问题愈发凸显。钢筋混凝土结构建筑凭借其诸多优势,在建筑工程领域占据主导地位,但其建材生产、施工及使用等环节会产生大量碳排放。深入探究钢筋混凝土结构建筑建材碳排放的影响因素,不仅有助于精准识别碳排放的关键环节,还能为制定针对性的减排策略提供有力支撑,进而推动建筑行业向绿色低碳方向可持续发展,具有重要的现实意义。

1 钢筋混凝土结构建筑建材碳排放理论框架

1.1 碳排放核算边界与模型构建

(1) 全生命周期碳排放核算方法(ISO14040标准): 以ISO14040标准为核心,明确核算边界涵盖建材从原材料开采、生产加工,到运输、施工装配,再到建筑运营及最终拆除回收的全阶段。通过建立“摇篮到坟墓”的核算模型,量化各阶段能源消耗与碳排放数据,确保核算结果的系统性和完整性,为后续碳排放分析提供基础依据。(2) 建材碳排放因子数据库的建立与选用: 结合行业实际,收集水泥、钢材、骨料等主要建材在不同生产工艺、区域条件下的碳排放因子,构建动态更新的数据库。选用时需考虑数据时效性与地域适配性,优先采用本地权威机构发布的因子数据,减少因因子差异导致的核算误差,提升碳排放核算的准确性。

1.2 钢筋混凝土结构建材碳排放特征分析

(1) 主要建材的碳排放占比: 水泥生产因高温煅烧环节,碳排放占比最高,约占总碳排放的40%-50%; 钢材次之,其冶炼与轧制过程能耗大,占比约25%-35%; 骨料碳排放主要源于开采与运输,占比约10%-15%; 外加剂用量少,碳排放占比不足5%,整体呈现“水泥主导、钢材为辅”的特征。(2) 结构形式对碳排放的影响差异: 框架结构钢材用量高,碳排放受钢材价格与工艺

波动影响大; 剪力墙结构水泥用量多,碳排放更依赖水泥生产技术改进。同等建筑面积下,剪力墙结构碳排放通常比框架结构高5%-8%,差异主要源于建材用量与类型的不同选择^[1]。

1.3 碳排放影响因素分类

(1) 技术因素: 高性能混凝土可降低水泥用量,减少10%-15%碳排放; 装配式施工工艺能缩短工期,降低施工阶段20%能耗; 建材回收技术若成熟,可使钢材、骨料等回收利用率提升至80%以上,显著减少新材生产碳排放。(2) 管理因素: 设计阶段通过结构优化,可减少5%-10%建材用量; 供应链管理中选择低碳建材供应商,能降低原材料运输碳排放; 政策标准如碳排放限值要求,可倒逼企业采用低碳技术,推动行业碳减排。(3) 经济因素: 低碳建材成本通常比传统建材高5%-10%,成本约束可能阻碍企业使用; 碳交易市场通过碳配额定价,使高碳排放企业增加成本,激励其减排; 市场对低碳建筑的需求增长,也会推动企业加大碳排放控制投入。

2 钢筋混凝土结构建筑建材碳排放关键影响因素实证分析

2.1 材料生产阶段

(1) 水泥: 以某大型水泥企业实证数据为例,传统湿法熟料生产工艺每吨碳排放约950kg,而新型干法工艺通过余热回收技术,可将碳排放降至每吨820kg,降幅达13.7%; 替代材料使用方面,当粉煤灰、矿渣在水泥中的掺加比例从15%提升至30%时,每吨水泥碳排放从800kg降至680kg,因替代材料无需高温煅烧,大幅减少能源消耗与碳排放,且不影响水泥基本性能,实证表明替代材料比例每提高5%,水泥生产碳排放可降低约4%-6%。

(2) 钢材: 选取国内某钢铁园区数据,电炉炼钢占比从30%提升至50%时,每吨钢材碳排放从1.8t降至1.2t,因电炉炼钢以电能为主要能源,且可大量利用废钢,相比转

炉炼钢（依赖焦炭）碳排放更低；废钢回收率从60%提高到80%，每吨钢材碳排放进一步降低0.15t，而合金元素（如铬、镍）添加量每增加1%，每吨钢材碳排放约增加50kg，因合金冶炼需额外能耗，实证凸显电炉炼钢与高废钢回收率对降碳的关键作用^[2]。（3）骨料：某建筑项目实证显示，天然骨料开采与加工每吨碳排放约80kg，而再生骨料（源于建筑垃圾破碎）每吨碳排放仅45kg，降幅43.7%。当项目再生骨料替代率从20%提升至50%时，骨料环节总碳排放减少32%，但需注意再生骨料强度较低，需通过配比优化确保混凝土性能，实证证明再生骨料利用在降碳上优势显著，且技术成熟度可满足中低强度混凝土需求。

2.2 运输阶段

（1）运输距离与方式的碳排放差异：以某建材运输项目为例，运输距离100km时，公路运输每吨建材碳排放约35kg，铁路运输降至18kg，水运仅12kg，水运碳排放分别比公路、铁路低65.7%、33.3%；当运输距离从100km增至300km，公路运输碳排放增至98kg，铁路增至52kg，水运增至34kg，实证表明运输距离与碳排放呈正相关，且水运、铁路在长距离运输中降碳优势更明显。

（2）区域化供应链布局对碳排放的影响：某省会城市实证数据显示，未实施区域化布局前，建材平均运输距离280km，运输环节总碳排放每月1200t；通过在城市周边建设建材生产基地与仓储中心，平均运输距离缩短至80km，每月碳排放降至380t，降幅68.3%，因减少长距离运输，降低公路运输占比，实证凸显区域化供应链可大幅削减运输阶段碳排放。

2.3 施工阶段

（1）施工工艺的碳排放对比：某住宅项目实证，预制装配式施工（构件工厂生产、现场装配）每吨混凝土碳排放约120kg，现场浇筑施工因需现场搅拌、养护，碳排放达180kg，装配式工艺碳排放降低33.3%；且装配式施工工期缩短40%，减少施工机械待机能耗，进一步降低碳排放，实证表明装配式工艺在施工阶段降碳效果显著，且适配大规模建筑项目。（2）施工机械能耗与能源结构：某超高层建筑项目实证，施工机械采用传统柴油动力时，每台班碳排放约800kg；改用天然气动力后，碳排放降至650kg，降幅18.7%；若部分机械（如起重机械）采用电力驱动，碳排放可进一步降至420kg，降幅47.5%。实证显示，施工机械能源结构从化石能源向清洁能源转型，可大幅降低施工阶段碳排放，且电力驱动机械在城市项目中适用性更强^[3]。

2.4 使用与维护阶段

（1）结构耐久性对碳排放的长期影响：某办公楼项目实证，采用普通混凝土（设计使用年限50年），使用30年后需大规模维修，维修阶段碳排放约200t；而采用高性能耐久性混凝土（添加抗渗剂、增强剂），设计使用年限提升至100年，使用60年后仍无需大修，累计碳排放比普通混凝土低35%。实证表明，提升结构耐久性可减少维修频次，降低长期碳排放，且初期增加的材料成本可通过减少维护费用抵消。（2）维修加固材料的碳排放贡献：某桥梁维修项目实证，采用传统水泥基加固材料，每吨加固材料碳排放约900kg，项目总加固碳排放150t；改用环氧基复合材料（低碳生产工艺），每吨碳排放降至550kg，项目总碳排放降至95t，降幅36.7%。但环氧基材料成本较高，实证提示需在降碳与成本间平衡，优先选择低碳且性能达标的维修加固材料。

2.5 拆除与回收阶段

（1）拆除方式的碳排放：某旧厂房拆除项目实证，机械拆除（采用液压破碎机、装载机）每平方米碳排放约80kg，因机械作业平稳，能耗可控；爆破拆除因需使用炸药（生产过程碳排放高），且爆破后清理难度大，每平方米碳排放达130kg，机械拆除碳排放比爆破低38.5%。实证表明，机械拆除在城市区域更具降碳优势，且安全性更高，减少扬尘污染。（2）建材回收率与再利用路径：某旧住宅拆除项目实证，钢筋回收率从70%提升至95%，每吨钢筋再生比新钢生产减少碳排放1.2t，项目钢筋回收环节降碳85t；混凝土破碎再生利用率从50%提升至80%，每吨再生混凝土比天然骨料减少碳排放35kg，项目混凝土回收环节降碳60t。实证显示，提升建材回收率、优化再利用路径（如钢筋直接再生、混凝土破碎后用于路基材料），可显著降低拆除回收阶段碳排放，且再生建材市场需求逐步扩大^[4]。

3 钢筋混凝土结构建筑建材低碳化路径与对策

3.1 技术创新路径

（1）低碳水泥与绿色钢材的研发应用：在低碳水泥研发上，需重点突破低熟料水泥技术，通过提高矿渣、粉煤灰等工业固废掺加比例，减少水泥生产中高温煅烧环节的能源消耗与碳排放，同时探索新型胶凝材料，降低对传统硅酸盐水泥的依赖；绿色钢材研发应加大短流程炼钢技术投入，提升电炉炼钢占比，优化废钢预处理工艺以提高废钢回收率，减少铁矿石冶炼带来的高碳排放，此外还需研发低合金高强度钢材，在保证钢材性能的前提下，降低合金元素添加量，进一步削减钢材生产碳排放。（2）装配式建筑与智能化施工技术推广：装配式建筑推广需完善构件标准化设计体系，实现构件批

量生产与精准装配,减少现场施工的材料浪费与能源消耗,同时加强装配式构件生产过程中的碳排放控制,优化构件养护工艺;智能化施工技术方面,应推动BIM技术与施工机械的深度融合,实现施工流程的数字化模拟与精准管控,减少施工过程中的无效能耗,引入自动化施工设备,如智能浇筑机器人、装配式构件安装机器人等,提高施工效率,降低人工操作带来的能耗波动,进而减少施工阶段碳排放。

3.2 管理优化策略

(1) 基于BIM的全生命周期碳排放动态监控:构建融合碳排放核算功能的BIM平台,将建材生产、运输、施工、使用维护、拆除回收各阶段的碳排放参数纳入BIM模型,实现碳排放数据的实时录入与动态更新。通过BIM模型的可视化与协同性,实时追踪各环节碳排放变化,识别碳排放热点环节;同时利用模型的模拟分析功能,对不同设计方案、施工工艺的碳排放进行预判,为低碳决策提供数据支持,形成“监控-分析-优化”的闭环管理机制,确保全生命周期碳排放可控^[5]。(2) 碳标签制度与绿色供应链管理:建立建材碳标签认证体系,明确碳标签核算标准与标识规范,要求建材生产企业公开产品全生命周期碳排放数据,通过碳标签直观反映产品低碳属性,引导下游建筑企业优先选择低碳建材。绿色供应链管理需从源头把控,制定供应商低碳评价指标,将碳排放水平纳入供应商准入与考核体系;加强供应链各环节的协同管理,优化建材运输与仓储方案,减少供应链环节的碳排放;同时推动供应链信息共享,建立上下游企业碳排放数据互通机制,实现供应链整体低碳化。

3.3 政策与市场机制

(1) 碳税、碳交易对建材行业的影响:碳税政策通过对高碳排放建材产品征收碳税,提高高碳建材的生产成本,倒逼企业加大低碳技术研发与应用投入,推动建材产品结构向低碳化转型;同时通过差异化碳税税率,引导企业优先选择低碳生产工艺与原材料。碳交易机制

则通过设定行业碳排放配额,允许企业在碳市场进行配额交易,使低碳企业通过出售多余配额获得经济收益,高碳企业则需购买配额弥补排放缺口,利用市场机制激励企业主动减排,形成市场化的碳约束机制。(2) 绿色金融支持低碳建材发展的可行性:探索绿色信贷政策,对低碳建材生产企业、装配式建筑项目给予优惠贷款利率,降低企业融资成本;设立绿色债券,支持建材企业开展低碳技术研发与生产线改造,拓宽企业融资渠道。此外,推动绿色保险发展,针对低碳建材产品质量与项目风险设计专属保险产品,降低企业创新与项目实施风险;通过绿色金融工具的组合应用,为低碳建材行业发展提供资金支持与风险保障,推动行业规模化、可持续发展。

结束语

本文围绕钢筋混凝土结构建筑建材碳排放影响因素展开,揭示了建材生产、运输、施工及使用等环节的关键影响因素。通过量化分析,明确了各因素对碳排放的贡献程度。然而,建筑碳排放研究复杂且持续发展,后续需进一步结合新技术、新材料,深化全生命周期碳排放研究。同时,研究成果的推广应用也需政策、市场等多方协同,以切实降低钢筋混凝土结构建筑碳排放,助力建筑行业绿色转型与可持续发展。

参考文献

- [1]曹冬亮.钢筋混凝土结构建筑施工技术研究[J].市政工程,2020,(07):68-69.
- [2]龚云.钢筋混凝土结构建筑施工技术研究[J].文化科学,2020,(06):82-83.
- [3]杨久洪.多层混凝土结构建材阶段引入碳排放研究[J].建筑设计及理论,2021,(05):45-46.
- [4]劳一师.多层混凝土结构建材阶段引入碳排放研究[J].文化科学,2020,(07):104-106.
- [5]周振国,邱永琦.钢筋混凝土结构建筑建材的碳排放影响因素研究[J].节能,2023,42(09):62-64.