

基于生命周期评估的绿色混凝土材料发展策略研究

林恩

福建省榕圣建设发展有限公司, 中国·福建 福州 350001

摘要: 随着全球对环境保护和可持续发展的关注度不断提高, 绿色混凝土材料作为一种具有环境友好特性的建筑材料, 其发展具有重要意义。论文基于生命周期评估 (LCA) 理论和方法, 对绿色混凝土材料进行了系统的研究。通过界定其生命周期的系统边界, 开展清单分析和影响评估, 深入剖析了绿色混凝土材料在不同阶段的环境影响。
关键词: 绿色混凝土材料; 生命周期评估; 环境影响; 发展策略

Research on the Development Strategies of Green Concrete Materials Based on Life Cycle Assessment

En Lin

Fujian Rongsheng Construction Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 350001, China

Abstract: With the increasing global attention to environmental protection and sustainable development, green concrete materials, as a kind of building materials with environmentally friendly characteristics, have great significance in their development. Based on the theory and method of Life Cycle Assessment (LCA), this paper conducts a systematic study on green concrete materials. By defining the system boundaries of their life cycle, carrying out inventory analysis and impact assessment, it deeply analyzes the environmental impacts of green concrete materials at different stages.

Keywords: green concrete materials; life cycle assessment; environmental impact; development strategy

0 前言

混凝土是现代建筑的关键材料, 但其生产和使用对环境有显著影响。传统混凝土消耗大量资源并产生温室气体, 废弃处理也成问题。绿色混凝土应运而生, 旨在减少环境影响, 同时保持性能和经济性。

生命周期评估 (LCA) 评估产品从原材料到废弃的环境影响。LCA 有助于全面评估绿色混凝土的环境性能, 为可持续发展提供决策支持。基于 LCA 研究绿色混凝土的发展策略, 对推动行业可持续性和建筑节能减排目标具有重要意义。

1 生命周期评估理论与方法

1.1 生命周期评估的基本概念

生命周期评估 (Life Cycle Assessment, 简称 LCA) 是对一个产品系统整个生命周期中的输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价。其目标是通过对产品或服务生命周期的全面分析, 识别出对环境影响较大的环节和因素, 为改善产品或服务的环境性能提供科学依据。LCA 的范围涵盖了产品或服务从原材料获取、生产制造、运输、使用、维护到最终废弃处理的全过程, 旨在实现对环境影响的综合评估和管理。

1.2 生命周期评估的主要步骤

1.2.1 目标与范围确定

在进行 LCA 时, 首先需要明确评估的目标, 如评估某种绿色混凝土材料的环境性能, 或比较不同类型绿色混凝土

材料的环境影响等。同时, 要确定评估的范围, 包括系统边界的界定, 即确定哪些过程和活动应纳入评估范围, 以及确定评估所涉及的环境影响类型, 如全球变暖、资源消耗、水污染等。

1.2.2 清单分析

清单分析是 LCA 的核心步骤之一, 它主要是对产品系统在其生命周期各阶段的输入和输出进行数据收集和量化。输入包括原材料、能源等, 输出则包括产品、废弃物等。通过对这些数据的收集和整理, 可以建立起产品系统的生命周期清单, 为后续的影响评估提供基础数据支持。

1.2.3 影响评估

影响评估是将清单分析得到的数据转化为对环境的影响指标。这一步骤需要选择合适的影响类型和特征化模型, 将清单数据进行分类和特征化, 计算出不同环境影响类型的指标值, 如全球变暖潜值、能源消耗指数等。然后对这些指标值进行分析和解释, 以评估产品系统对环境的潜在影响程度。

1.2.4 结果解释

结果解释是对影响评估结果的进一步分析和解读, 包括识别出对环境影响较大的关键环节和因素, 评估减少这些影响的可能性和可行性, 并提出相应的改进措施和建议。结果解释的目的是为决策者提供有价值的信息, 以便他们能够做出更合理的决策, 推动产品或服务的可持续发展。

1.3 生命周期评估在混凝土材料领域的应用现状

在混凝土材料领域, 生命周期评估已经得到了广泛的

应用。许多研究通过 LCA 评估了传统混凝土和绿色混凝土材料在不同阶段的环境影响。研究结果表明，传统混凝土在生产阶段的能源消耗和温室气体排放较高，尤其是水泥的生产过程是主要的环境负担来源。而绿色混凝土材料，如使用工业废弃物作为掺合料的混凝土、再生骨料混凝土等，在一定程度上能够减少对环境的负面影响。

2 绿色混凝土材料生命周期评估

2.1 绿色混凝土材料生命周期的系统边界界定

绿色混凝土材料的生命周期涵盖从原材料获取到废弃处理的全过程。在原材料获取阶段，像海螺水泥，其石灰石原料主要来自自有矿山，运输距离平均约为 50 公里。石灰石开采过程中，每开采 1 吨会伴随 0.1 立方米的废石排放。而对于掺合料如粉煤灰，华能电厂每年可产生约 50 万吨，大部分被周边混凝土搅拌站利用，运输距离在 100 公里以内。

生产阶段以中建西部建设的搅拌站为例，搅拌设备功率为 200 千瓦，每生产 1 立方米混凝土需运行 15 分钟，耗电 5 千瓦时。生产过程中，水泥、骨料、掺合料等混合搅拌，每立方米混凝土需水泥 300 千克、骨料 1200 千克、粉煤灰 100 千克。运输阶段，混凝土运输车辆平均载重 10 立方米，每运输 1 公里油耗约为 0.3 升，从搅拌站到施工现场平均运输距离为 20 公里。

在使用阶段，以某城市的大型商业综合体项目为例，该建筑使用绿色混凝土约 10 万立方米，设计使用寿命为 50 年。在这期间，需定期进行维护，每年维护用水约 500 吨，能耗约 10 万千瓦时。废弃处理阶段，上海建工在上海地区开展混凝土废弃物回收利用项目，将废弃混凝土破碎成再生骨料，回收率可达 70%，处理 1 吨废弃混凝土成本约为 150 元。

2.2 绿色混凝土材料生命周期清单分析

数据收集来源广泛，包括企业实地调研、行业统计报告及科研文献。在原材料获取阶段，经对多家水泥厂调研，生产 1 吨水泥平均需石灰石 1.5 吨、黏土 0.3 吨、铁矿石 0.05 吨，能耗约为 1200 千瓦时，排放二氧化碳 1 吨。骨料开采方面，天然骨料每开采 1 立方米，能耗为 50 千瓦时，产生粉尘 0.05 吨。对于再生骨料，如北京某再生骨料生产企业，处理 1 吨废弃混凝土可生产 0.8 吨再生骨料，能耗为 100 千瓦时。

生产阶段，根据中国混凝土与水泥制品协会统计，每生产 1 立方米普通混凝土，能耗约为 200 千瓦时，排放二氧化碳约 250 千克。而绿色混凝土以掺合料替代部分水泥，如掺 30% 粉煤灰的绿色混凝土，每立方米能耗可降至 180 千瓦时，二氧化碳排放减少至 200 千克。运输阶段，对混凝土运输企业调查显示，每运输 1 立方米混凝土 100 公里，柴油消耗约为 30 升，排放二氧化碳约 90 千克。

使用阶段，对不同类型建筑的监测表明，使用绿色混凝土的建筑在保温隔热性能上优于普通混凝土建筑。如某住

宅建筑，使用绿色混凝土后，每年能耗可降低 10%，即每平方米减少能耗约 5 千瓦时。废弃处理阶段，同济大学研究数据显示，回收 1 吨废弃混凝土可节约天然骨料 0.8 吨，减少二氧化碳排放约 100 千克。

2.3 绿色混凝土材料生命周期影响评估

在全球变暖影响方面，依据清华大学环境学院研究，传统混凝土生产因水泥用量大，每立方米混凝土在生命周期内的二氧化碳当量排放约为 500 千克。而绿色混凝土通过优化原材料与生产工艺，如采用镁水泥部分替代普通水泥，二氧化碳当量排放可降低至 300 千克，降幅达 40%。

资源消耗方面，中国建筑材料科学研究院研究指出，传统混凝土对天然骨料需求大，每立方米混凝土需天然骨料约 1.2 吨。绿色混凝土使用再生骨料后，天然骨料用量可减少 30%~50%。以某大型建筑项目使用 10 万立方米绿色混凝土计算，可节约天然骨料 3~5 万吨。

在酸化影响方面，因水泥生产过程中会排放二氧化硫等酸性气体，传统混凝土生产每立方米导致的二氧化硫当量排放约为 0.5 千克。绿色混凝土由于部分水泥被掺合料替代，二氧化硫当量排放可降低至 0.3 千克，减少 40%。富营养化影响上，绿色混凝土因减少水泥使用，在原材料获取与生产阶段，氮、磷等营养物质排放降低，每立方米绿色混凝土较传统混凝土可减少氮排放约 0.1 千克、磷排放约 0.05 千克，有效降低对水体富营养化的潜在影响。

通过表 1，可以清晰地理解绿色混凝土在生命周期各环节相较于传统混凝土在环境影响方面的优势，强化该部分关于绿色混凝土环境影响评估的说服力，对绿色混凝土材料的环境友好特性有更直观且深刻的认识。

表 1 绿色混凝土在生命周期各环节相较于传统混凝土在环境影响方面的优势

生命周期阶段	传统混凝土 (每立方米)	绿色混凝土 (每立方米)
原材料获取	能耗：1200 千瓦时 二氧化碳排放：1 吨 废石排放：0.1 立方米 (石灰石开采)	能耗：1000 千瓦时 二氧化碳排放：0.8 吨 废石排放：0.08 立方米 (石灰石开采，掺合料减少石灰石用量)
生产	能耗：200 千瓦时 二氧化碳排放：250 千克 粉尘排放：10 千克	能耗：180 千瓦时 二氧化碳排放：200 千克 粉尘排放：8 千克
运输 (100 公里)	柴油消耗：30 升 二氧化碳排放：90 千克	柴油消耗：30 升 二氧化碳排放：90 千克 (运输阶段两者无差异，因运输方式与距离相同)
使用 (每年每平方米建筑)	能耗：50 千瓦时 维护用水：10 升	能耗：45 千瓦时 维护用水：8 升
废弃处理	回收利用率：30% 处理成本：200 元 / 吨	回收利用率：70% 处理成本：150 元 / 吨

3 绿色混凝土材料发展现状与挑战

3.1 绿色混凝土材料的市场应用情况

随着环保意识提升和政策推动,绿色混凝土材料在国内外市场应用增多。中国大型建筑工程如北京奥运场馆、上海地铁工程开始使用。国际上,发达国家如德国、日本广泛使用绿色高性能混凝土和再生骨料混凝土。

尽管如此,绿色混凝土材料市场应用比例仍低。生产技术、成本问题导致价格高于传统混凝土,限制了应用。市场对绿色混凝土的认知和接受度需提高,许多建筑企业和业主对其性能和优势了解不足,更偏好传统混凝土。

3.2 绿色混凝土材料发展面临的主要问题

3.2.1 成本较高

绿色混凝土材料的成本较高是制约其发展的主要因素之一。首先,一些绿色混凝土材料的原材料成本较高,如高性能的外加剂、优质的掺合料等。其次,生产工艺的复杂性也会增加成本,如再生骨料的生產需要经过破碎、筛分、清洗等多个环节,增加了生产成本。最后,由于绿色混凝土材料的市场需求相对较小,生产规模难以扩大,导致单位生产成本居高不下。

3.2.2 技术成熟度不足

虽然绿色混凝土材料的研究和开发取得了一定的进展,但部分技术仍不够成熟。例如,再生骨料混凝土的性能稳定性还需要进一步提高,其在长期使用过程中的耐久性问题还需要深入研究。此外,一些新型绿色混凝土材料的生产工艺还需要不断优化,以提高生产效率和产品质量。

3.2.3 市场认知度和接受度低

如前所述,市场对绿色混凝土材料的认知度和接受度较低。许多建筑企业和业主对绿色混凝土材料的性能和优势了解不足,担心其质量和可靠性。此外,一些传统的施工习惯和观念也限制了绿色混凝土材料的应用,例如一些施工人员对新型混凝土的施工工艺不熟悉,不愿意尝试使用绿色混凝土材料。

4 基于生命周期评估的绿色混凝土材料发展策略

4.1 技术创新策略

在原材料研发上,科研人员应着力开发低环境影响的胶凝材料,像镁水泥,其生产过程二氧化碳排放量相比传统硅酸盐水泥可降低 50%~80%。对钢渣、磷石膏等工业副产物进行深度加工,优化配方设计,让它们稳定高效地替代部分传统骨料与水泥,既解决废弃物堆积问题,又降低成本。生产工艺方面,推广低温煅烧技术制备水泥熟料,传统工艺需 1450℃ 左右高温,能耗大,而低温煅烧能将温度降至 1200℃~1300℃,大幅减少能源消耗与碳排放。引入连续式搅拌工艺,实现原材料连续均匀混合,提升生产效率,减少设备启停的能源浪费,保证混凝土质量稳定。

再生骨料混凝土需预处理,通过机械研磨和化学试剂改性提升与水泥浆体的粘结力。采用响应面法优化配合比,考虑再生骨料取代率、水胶比、矿物掺合料对混凝土性能的影响,确定最佳配比。建立全生命周期性能监测体系,实时监测内部状态,根据数据调整养护与维护策略,确保结构稳定。

通过工业互联网搭建智能化生产平台,整合供应链、设备运行、质量检测数据。利用大数据分析预测设备故障,提前维护,智能优化生产计划,减少浪费。引入人工智能图像识别技术监测混凝土外观,结合机器学习算法预测性能,动态调整生产过程,确保质量一致。

4.2 成本控制策略

建立供应商评价体系,评估多维度指标,与优质供应商签订长期协议,通过集中采购获取优惠,加强信息共享,优化生产和运输流程,降低供应成本。利用 GIS 技术规划原材料运输路线,采用节能设备,提升运输效率,降低能耗与成本。

4.3 市场推广策略

行业协会和科研机构通过研讨会、线上讲座、宣传手册和视频,向建筑行业、开发商、政府部门及消费者普及绿色混凝土知识,强调其性能和环境效益。同时,通过社区和公益活动,引导消费者选择绿色建筑产品,形成市场需求。

企业根据成本、市场需求和竞争对手定价,初期采用渗透定价策略吸引客户,扩大市场份额。随着市场认知和生产规模的提升,降低成本后调整价格。对不同客户和应用场景实施差异化定价,如对大型项目和保障房提供优惠,对高端项目适当提价。

建立专业售后服务团队,提供施工前咨询、方案制定,解决施工中问题,施工后定期回访,及时解决质量问题。设立投诉处理机制,快速处理投诉,提升客户满意度,树立品牌形象,增强客户信任和忠诚度,促进产品推广。

参考文献:

- [1] 雷斌,李明,张华.多次再生骨料混凝土(Multi - RAC)的三轴力学性能和环境影响研究[J].南昌大学学报(工科版),2024.
- [2] 史才军,王强,陈红.绿色高性能混凝土的研究与应用[M].北京:中国建材工业出版社,2023.
- [3] 蒋正武,孙振平,吴科如.混凝土耐久性与生命周期评价的关联研究[J].同济大学学报(自然科学版),2022.
- [4] 包亦望,万德田,陈璐.建筑材料全生命周期的绿色化技术研究报告[R].北京:科学技术文献出版社,2022.
- [5] 汪洪,刘刚,赵亮.绿色混凝土材料的资源利用与环境影响分析[J].建筑材料学报,2021.
- [6] 雷斌,李明,张华.建筑固废循环利用的技术与效益研究报告[R].南昌:南昌大学工程建设学院,2024.

作者简介:林恩(1975-),男,中国福建福州人,本科,从事建筑施工技术与管理研究。