

# 基于混凝土生产全生命周期碳中和评价与控制措施

佟琳, 宋蕴桥, 未立洪, 路峰峰, 郑文才, 李维峰

北京建工新型建材有限责任公司, 北京

收稿日期: 2025年7月14日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月15日

## 摘要

本文从混凝土生产全生命周期出发, 通过确定科学合理的计算边界, 建立计算模型, 并对混凝土生产全生命周期内碳排放源进行跟踪分类, 计算边界内从原材料的生产及运输到混凝土的生产及运输过程中涉及的所有碳排放量, 得出水泥是混凝土中碳排放的主要来源, 因此, 认为降低水泥用量是混凝土企业减少碳排放的关键任务。本文采用在混凝土中大量掺加粉煤灰的技术, 以减少水泥用量, 从而达到降低二氧化碳排放量至低碳产品限值的要求。结论: 大掺量粉煤灰的混凝土对比普通混凝土, 可降低混凝土碳排放量大约24%至25%, 每立方米混凝土二氧化碳可降低50千克。

## 关键词

混凝土生产全周期, 碳排放计算边界, 混凝土碳排放量, 混凝土减碳路径

# Carbon Neutrality Evaluation and Control Measures Based on the Whole Cycle of Concrete Production

Lin Tong, Yunqiao Song, Lihong Wei, Fengfeng Lu, Wencai Zheng, Chufeng Li

BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., Beijing

Received: Jul. 14<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 4<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 15<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper starts from the full life cycle of ready-mixed concrete production. By determining scientific and reasonable calculation boundaries, establishing a calculation model, and tracking and classifying the carbon emission sources during the full life cycle of ready-mixed concrete production,

文章引用: 佟琳, 宋蕴桥, 未立洪, 路峰峰, 郑文才, 李维峰. 基于混凝土生产全生命周期碳中和评价与控制措施[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 1929-1934. DOI: 10.12677/hjce.2025.148210

all carbon emissions involved in the process from the production and transportation of raw materials to the production and transportation of concrete within the calculation boundary are calculated. It is concluded that cement is the main source of carbon emissions in concrete, and thus reducing the amount of cement used is the core task for concrete enterprises to reduce carbon emissions. In this paper, the method of adding a large amount of fly ash to concrete to reduce the amount of cement used is adopted, so that the carbon dioxide emissions meet the requirements of the low-carbon product limit. The conclusion is that for concrete with a high proportion of fly ash, the carbon emissions of concrete can be reduced by 24%~25%, exceeding 50 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

### Keywords

The Full Life Cycle of Concrete Production, Carbon Emission Calculation Boundary, Concrete Carbon Emissions, Concrete Carbon Reduction Path

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

随着我国经济高速发展，同时伴随着能源的快速消耗和碳排放的不断增加，2030年前实现碳达峰和2060年前实现碳中和的目标[1]，促使建筑行业的环保标准愈发严苛。混凝土作为建筑领域的主要材料，生产过程中产生的二氧化碳排放量占全国碳排放总量的13.5%，由此可见混凝土行业实现碳中和可以降低对环境的污染，并提升建筑的可持续性，这与环保政策和法规相符合。

混凝土生产全生命周期质量评价，包括从原材料制造到混凝土到达施工现场的全部过程，建立全周期内二氧化碳排放量的计算方法，通过清单数据和量化模型计算每立方C30混凝土中二氧化碳排放量，对比大量使用粉煤灰混凝土CO<sub>2</sub>排放量的变化，为混凝土产品减排提供研究方向，同时为大掺量粉煤灰混凝土的应用推广提供参考。

## 2. 预拌混凝土碳排放计算边界及清单

从混凝土生产全生命周期出发，构建了计算边界，并给出了对应的计算公式与指导性计算参数。

### 2.1. 计算边界

在混凝土生产全周期碳排放量计算中，以原材料的生产为始点，将混凝土运输至施工现场作为终点，该系统边界是指从摇篮到大门的循环系统边界，用于计算在该周期内单位混凝土的碳排放量。见图1。

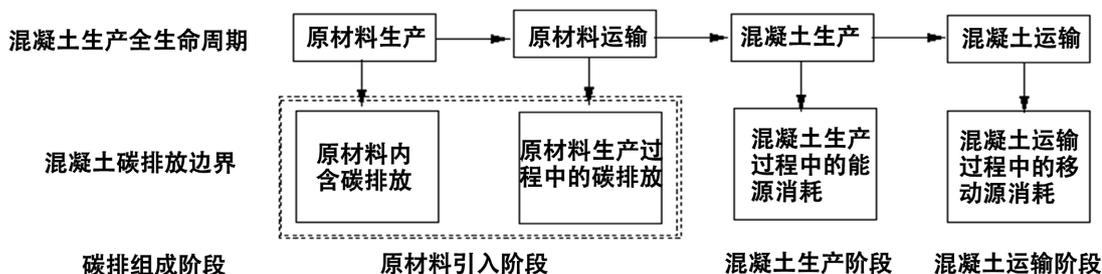


Figure 1. Calculation boundary of concrete carbon emissions

图1. 混凝土碳排放计算边界

## 2.2. 确定混凝土碳排放清单

通过对混凝土生产全生命周期内碳排放源的追踪, 将其划分为四个部分, 包括原材料生产过程中的碳排放、原材料运输至搅拌站的碳排放、混凝土在生产过程中的碳排放以及混凝土运输至施工现场大门的碳排放[2], 由此, 我们可以确定混凝土的碳排放清单, 见表 1。

Table 1. Carbon emission inventory of concrete

表 1. 混凝土碳排放清单

	碳排放组成阶段	计算单内容
C1	原材料内含碳排放	原材料制造环节会产生能源消耗和产品加工过程中自身的温室气体排放量
C2	原材料运输过程碳排放	原材料通过交通工具运送至搅拌站产生的二氧化碳排放量
		原材料在搅拌站厂区内运送过程产生的二氧化碳排放量
C3	混凝土生产过程碳排放	混凝土生产过程中固定源装置所产生的二氧化碳排放量
		混凝土生产过程中电力消耗产生的二氧化碳排放量
		混凝土生产过程中热力消耗产生的二氧化碳排放量
C4	混凝土运输过程碳排放	混凝土通过车辆运输至现场大门过程产生的二氧化碳排放量

## 2.3. 混凝土碳排放阶段计算

根据表 1 混凝土碳排放清单中确定碳排放组成阶段, 开始计算混凝土碳排放量:

### 2.3.1. 原材料内含碳排放量

原材料内含碳排放量  $C1$ , 公式如下:

$$C1 = \sum a_i \times K_i$$

$a_i$  为第  $i$  类原材料的消耗量, 单位为千克(kg);

$K_i$  为第  $i$  类原材料生产过程的二氧化碳排放量, 单位为千克二氧化碳每千克(kg CO<sub>2</sub>/kg), 具体数据可参考 T/CBMF27-2018《预拌混凝土低碳产品评价方法及要求》[3]。

### 2.3.2. 原材料运输过程碳排

原材料运送至混凝土拌合站所产生的碳排放量  $C2$ , 其计算公式如下:

$$C2 = \sum_i (f_j + b_j f_j^i) d_i m_i$$

式中,  $f_j$  为第  $i$  类原材料采用第  $j$  类运输方式的直接碳排放量系数;  $b_j$  为第  $j$  类运输方式的单位运输能耗;  $f_j^i$  为第  $j$  类能源的间接碳排放量系数;  $d_i$  为第  $i$  类原材料的运输距离。  $m_i$  为第  $i$  类材料的用量。

### 2.3.3. 混凝土生产过程碳排

混凝土生产过程的二氧化碳排放是  $C3$ , 大部分由能源消耗, 其计算公式为:

$$C3 = \sum_j h_j F_j$$

式中,  $h_j$  为生产 1 立方混凝土过程中第  $j$  类能源消耗量。  $F_j$  为第  $j$  类能源排放系数, 取值取  $f_j$  和  $f_j^i$  的总和。

### 2.3.4. 混凝土运输过程碳排放

混凝土从搅拌站出厂运送至施工现场会产生碳排放量  $C4$ , 其计算公式为:

$$C4 = (f_j + b_j f_j^i) d_c M$$

式中,  $d_c$  为混凝土运输距离;  $M$  为  $1 \text{ m}^3$  混凝土总质量, 且  $M = \sum_i m_i$

### 2.3.5.1 立方米混凝土碳排放量

混凝土生产全生命周期中的 1 立方米混凝土碳排放  $C$ , 其计算公式为:

$$C4 = C1 + C2 + C3 + C4$$

## 3. 碳排放计算及大量掺加粉煤混凝土试验结果分析

### 3.1. 配合比设计

我们主要研究和探索混凝土减碳的途径和效果, 重点聚焦于低用水量高掺量粉煤灰的混凝土。根据表 2 所示, S1、S2 为试验组数据, 其混凝土胶凝材料的用量为  $350 \text{ kg/m}^3$ , 水胶比为 0.36, 基准数据为搅拌站 C30 混凝土基准配合比。该试验所用的粉煤灰来源为中国内蒙古, 其需要水量为 85%, 所需量为  $200 \text{ kg/m}^3$ 。采用多级配复合技术, 粒径范围为 5 毫米至 10 毫米、10 毫米至 16 毫米和 16 毫米至 25 毫米的粗骨料配比为 1:1:1。

**Table 2.** Mix proportion of concrete with a large amount of fly ash added ( $\text{kg/m}^3$ )

**表 2.** 大量掺加粉煤灰混凝土的配合比( $\text{kg/m}^3$ )

编号	水胶比	砂率%	水泥	粉煤灰	矿粉	水	砂	石	减水剂	总用水量
S1	0.36	43	150	200	0	126	770	1025	7.0	130
S2	0.36	45	150	200	0	126	813	1002	7.7	131
基准	0.46	48	220	54	85	165	825	911	5.7	165

根据混凝土基准配合比计算每种材料的碳排放质量如表 3 所示, 发现水泥是二氧化碳排放量较大产品, 因此降低水泥用量成为混凝土搅拌站减碳的重点措施。

**Table 3.**  $\text{CO}_2$  emissions generated during the production process of raw materials

**表 3.** 原材料生产过程中产生的  $\text{CO}_2$  排放量

碳排放质量 ( $\text{gCO}_2/\text{kg}$ )	水泥	矿粉	粉煤灰	机制砂	石	减水剂	水
	0.732	0.062	0.034	0.042	0.004	0.720	0

同时根据表 2 所列的配合比进行试拌, 得出 S1、S2 和基准试验组混凝土的坍落度、容重和抗压强度的实验数据如表 4 所示。

**Table 4.** Physical performance test results of concrete

**表 4.** 混凝土物理性能试验结果

编号	工作性描述	掺合料掺量 (%)	掺合料的体 积分数(%)	坍落度(mm)	容重( $\text{kg/m}^3$ )	3 d 强度 (MPa)	28 d 强度 (MPa)
S1	和易性良好, 倒筒试验一般	57.1	13.1	200	2420	21.1	48.0
S2	和易性良好, 倒筒试验良好	57.1	13.1	210	2430	19.5	50.8
基准	和易性良好	38.7	12.5	220	2400	23.6	43.8

根据上述实验结果, 得到如下结论:

(1) 通过上述试配试验可证实通过改变粗骨料级配,大量使用需水量较低的粉煤灰能有效减少水泥用量;

(2) 通过控制混凝土砂率和用水量,混凝土的和易性良好,当提高混凝土砂率时,混凝土的初期强度有所减小;

(3) 通过减少用水量并增加粉煤灰的用量,可以使得混凝土的密度有所增加。

### 3.2. 混凝土碳排放及性能试验结果与分析

计算 1 立方米 C30 混凝土二氧化碳排放量如表 5 所示。

Table 5. Carbon emissions and strength values of C30 concrete

表 5. C30 混凝土碳排放量与强度值

编号	计算碳排放量 (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	碳排放减少量 (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	降幅(%)	28 d 强度(MPa)	28 d 强度与基准差值 (MPa)
S1	158.5	52.9	25.0	48.0	4.2
S2	160.6	50.8	24.0	50.8	7.0
基准	211.4	-	-	43.8	-

根据上表,使用低用水量高掺量粉煤灰的混凝土,能够减少二氧化碳排放量 24%至 25%,每立方混凝土二氧化碳排放量降低超过 50 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>,且混凝土 28 天强度均高于基准强度。

### 3.3. 大掺量粉煤灰混凝土干缩试验

混凝土中使用大掺量粉煤灰时须关注混凝土的收缩开裂问题,试验结果如图 2 所示,大量使用粉煤灰对混凝土的干燥收缩无显著影响。

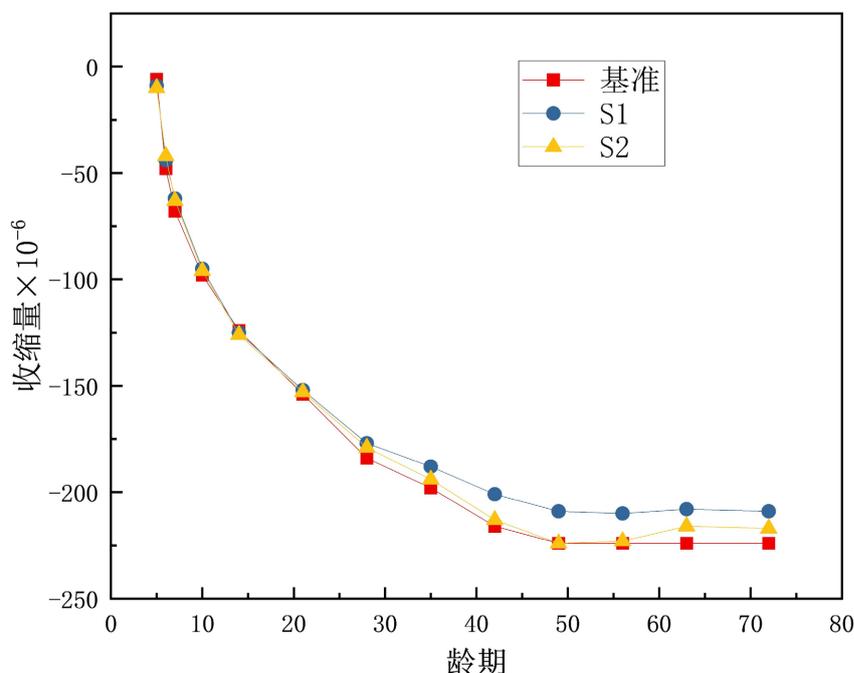


Figure 2. Concrete shrinkage strain

图 2. 混凝土收缩应变

## 4. 混凝土生产过程中实现碳中和的具体措施

### 4.1. 混凝土搅拌站设施设备升级

- (1) 提升改造混凝土生产投料系统, 提出“搅拌站均化投料法”[4], 可提高生产效率, 降低能源消耗。
- (2) 粉料吹灰装置改为负压吹灰, 可降低成本、降低噪音、同时减少车辆的尾气排放, 推动低碳改造。
- (3) 强力推进能源利用方式转变, 加快能源结构调整。使用电力驱动替代柴油驱动, 推动砼站粉料输送智能化、高效化、绿色化发展。

### 4.2. 清洁能源的应用

光伏和风电作为清洁能源, 减碳效果显著, 一座 1 MW 工商业光伏电站每年可减少约 1196.4 吨的二氧化碳排放量[5], 随着技术的进步, 光伏和风电的成本也有了大幅度的降低, 使其在能源结构中的应用占比逐渐提高, 光伏和风电将成为替代存量能源需求的主力军。

## 5. 结论

(1) 经过对混凝土搅拌站的碳排放进行分析发现混凝土生产环节的碳排放占比最少, 只占 1%, 而原材料含碳量高达 86%。通过对原材料的隐含碳可以发现, 水泥是降低混凝土碳量的关键, 在混凝土中通过大掺量使用粉煤灰, 其减碳效果显著。

(2) 在混凝土中大量掺加粉煤灰来降低水泥用量的方法得出结论: 大掺量粉煤灰的混凝土, 混凝土碳排放量可降低 24%~25%, 超过 50 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>。

(3) 现行国家标准中在矿物掺合料适用方面严格限定了混凝土中矿物掺合料的掺量不大于 55% [6], 而文中试验组配比用矿物掺合料的质量占比为 57.1%。在满足现行标准要求的前提下, 矿物掺合料可以减少至少 20 kg 的水泥, 由此带来的混凝土碳排放的降低将至少达到 6%, 减少的碳排放是混凝土生产和运输两个环节碳排放之和的 2~4 倍, 并且大量使用粉煤灰对混凝土的干燥收缩无显著影响。

(4) 通过提升混凝土搅拌站设施设备生产效率, 使用新型清洁能源, 可有效降低能耗, 从而减少混凝土碳排放量。

## 参考文献

- [1] 免费直播|3月25日组织“双碳战略”实践路线图[EB/OL]. [https://www.thepaper.cn/newsDetail\\_forward\\_17300030](https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_17300030), 2025-01-15.
- [2] 段后红. 混凝土全寿命周期碳排放分析及减排措施[J]. 建设科技, 2024(1): 38-40+44.
- [3] 预拌混凝土低碳产品评价方法及要求: T/CBMF 27-2018 [S]. 2018.
- [4] 贾晓松, 陈涛, 李波. 如何提高混凝土搅拌站生产效率[J]. 科技风, 2013(2): 73.
- [5] 光伏电站碳减排如何核算, 如何进行 CCER 开发[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1714127107584469628&wfr=spider&for=pc>, 2025-01-15.
- [6] 矿物掺合料应用技术规范: GB/T 51003-2014 [S]. 2014.