

基于全生命周期评价法的预拌混凝土碳足迹计算分析及碳减排研究

潘远山, 龚健, 张坤, 王乔, 王宇佳

(浙江省建材集团有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 预拌混凝土作为最主要的建材消耗品之一, 碳减排潜力巨大。以不同强度等级的预拌混凝土作为研究对象, 基于全生命周期评价法, 针对各环节进行碳足迹计算, 研究相应碳减排技术。强度为 C30、C35、C40 的泵送预拌混凝土生命周期的碳排放量分别为 273.19、291.06、320.10 kgCO_{2e}/m³, 碳排放量与强度等级呈正相关, 因此选用低碳水泥或者减少水泥用量是降低预拌混凝土碳排放量最直接有效的手段。此外, 通过采用智能化运输、生产技术, 固封 CO₂ 混凝土技术等手段也能实现混凝土的辅助降碳。

关键词: 预拌混凝土; LCA; 碳足迹; 碳减排

中图分类号: TU201.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-702X(2024)04-0145-05

Calculation and analysis of carbon footprint of ready-mixed concrete based on LCA and research on carbon emission reduction technology

PAN Yuanshan, GONG Jian, ZHANG Kun, WANG Qiao, WANG Yujia

(Zhejiang Building Materials Group Co. Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: As one of the most important building materials consumables, ready-mixed concrete has enormous potential for carbon reduction. This article takes ready-mixed concrete of different strength levels as the research object, and based on the Full Life Cycle Assessment method, carbon footprint analysis is conducted for each link, and corresponding carbon emission reduction technologies are studied. The carbon emissions during the life cycle of pumped ready-mixed concrete with strengths of C30, C35, and C40 are 273.19, 291.06, 320.10 kgCO_{2e}/m³, respectively. The carbon emissions are positively correlated with the strength grade. Therefore, choosing low-carbon cement or reducing cement usage is the most direct and effective means to reduce the carbon emissions of ready-mixed concrete. In addition, auxiliary carbon reduction of concrete can also be achieved through the use of intelligent transportation, production technology, and CO₂ concrete sealing technology.

Key words: ready-mixed concrete, life cycle assessment, carbon footprint, carbon emission reduction technology

0 引言

预拌混凝土是建筑工程中消耗量最大的材料之一, 据统计^[1], 2021 年我国预拌混凝土产量达 32.93 亿 m³, 而混凝土从原材料到生产、运输以及使用过程会产生大量的 CO₂, 占建筑总排放量的 82%^[2]。混凝土已经成为建材类别中温室气体排放的最主要来源之一。混凝土属于高排放、高污染的行业, 对我国提出的“双碳”目标带来较大挑战^[3], 预拌混凝土行业的碳减排势在必行。目前, 国内外预拌混凝土行业相关的碳足迹研

究评估的方法仍然比较分散, 主要有投入产出法和生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)等, LCA 是一种调查和评估环境荷载以及评估产品或服务的所有阶段所产生的环境影响的方法^[4]。基于生命周期法的碳足迹计算, 是充分考虑产品整个流程的计算方法, 包含产品上、下游的数据, 具备客观、量化等方面的优点, 在各个行业尤其是能源、建材领域得到广泛应用。

1 预拌混凝土碳足迹计算

1.1 全生命周期碳排放计算方法

本文依据 PAS2050: 2011《商品和服务生命周期内的温室气体排放评价规范》, 功能单位选取 1 m³ 预拌混凝土, 建立预拌混凝土全生命周期系统边界, 即包括原材料获取、原材料运

收稿日期: 2023-11-03; 修订日期: 2024-04-23

作者简介: 潘远山, 男, 1995 年生, 硕士, 工程师, E-mail: 1137739978@qq.com。

输、生产加工、产品运输、产品使用及产品废弃等环节。

1.2 各环节碳足迹计算

1.2.1 原材料获取阶段碳足迹计算

原材料用量清单如表 1 所示。数据来源于某混凝土生产企业 2022 年度 C15~C55 不同等级、泵送与非泵送预拌混凝土单位原材料平均用量,其中水泥均为 42.5 级普通硅酸盐水泥。

表 1 C15~C55 预拌混凝土单位原材料用量 kg/m³

混凝土等级	水泥	矿粉	粉煤灰	细砂	机制砂	瓜子片	石子	水	外加剂
C15 泵送	109	35	53	243	794	345	555	137	3.34
C15 非泵	108	34	52	253	797	368	542	122	3.58
C20 泵送	151	39	57	241	777	445	467	110	6.64
C20 非泵	146	38	56	244	773	510	378	108	6.35
C25 泵送	187	44	56	247	710	364	573	93	9.31
C25 非泵	196	36	52	250	713	435	470	91	8.58
C30 泵送	252	47	49	186	746	208	731	82	10.48
C30 非泵	237	50	50	223	673	263	695	79	11.12
C35 泵送	273	52	50	163	751	192	740	83	11.96
C35 非泵	270	64	55	225	591	248	739	83	13.47
C40 泵送	311	53	55	156	718	185	761	85	11.86
C40 非泵	310	50	55	142	701	203	761	84	12.08
C45 泵送	351	52	53	99	708	198	757	88	13.04
C45 非泵	343	55	55	173	591	229	775	85	13.87
C50 泵送	409	58	53	49	723	157	773	96	11.23
C50 非泵	402	75	50	155	410	243	819	81	14.8
C55 泵送	424	85	41	117	620	160	849	77	16.37
C55 非泵	421	85	42	115	595	191	848	74	17.13

原材料碳排放因子如表 2 所示,其中水泥、细砂、瓜子片、石子和水的碳排放因子取自 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,矿粉、粉煤灰、机制砂、外加剂的碳排放因子取自参考文献[5]。

表 2 预拌混凝土原材料碳排放因子

原材料种类	碳排放因子/(kgCO _{2e} /kg)	原材料种类	碳排放因子/(kgCO _{2e} /kg)
水泥	0.78500	矿粉	0.06235
细砂	0.00251	粉煤灰	0.03450
瓜子片	0.00218	机制砂	0.04170
石子	0.00218	外加剂	0.72000
水	0.00017		

功能单位预拌混凝土原材料获取阶段碳排放按式(1)计算:

$$R_m = \sum_{i=1}^n Q_i \times E_i \tag{1}$$

式中:R_m——功能单位预拌混凝土原材料获取碳排放总量,

kgCO_{2e};

Q_i——第 i 种预拌混凝土原材料用量,kg;

E_i——第 i 种预拌混凝土原材料碳排放因子,kgCO_{2e}/kg。

1.2.2 原材料运输阶段碳排放计算

原材料的运输平均距离如表 3 所示。由于原材料供应商变化导致运输距离、运输方式会发生变化,本文通过加权平均的方法,根据各供应商实际的供应数量作为比重计算得出原材料的平均运输距离。运输方式的碳排放因子取自 GB/T 51366—2019,其中陆运选用重型柴油货车运输(载重 18 t),相应的碳排放因子为 0.129 kgCO_{2e}/(t·km)。

表 3 预拌混凝土原材料平均运输距离及运输方式

项 目	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	石子	外加剂
运输方式	汽运	汽运	汽运	船运	船运	汽运
运输距离/km	73	78	115	48	152	112

功能单位原材料运输阶段碳排放按式(2)计算:

$$R_n = \sum_{i=1}^n Q_i \times D_i \times F_i \tag{2}$$

式中:R_n——预拌混凝土原材料运输碳排放总量,kgCO_{2e};

Q_i——第 i 种预拌混凝土原材料用量,kg;

D_i——第 i 种预拌混凝土原材料运输距离,km;

F_i——第 i 种预拌混凝土原材料运输碳排放因子,

kgCO_{2e}/(kg·km)。

1.2.3 产品加工生产阶段碳排放计算

产品加工生产阶段的碳排放主要来源于水泵、混凝土搅拌设备等生产机械设备运行所产生的电力消耗以及铲车等车辆使用产生的柴油消耗,1 m³ 预拌混凝土生产阶段消耗的能源量如表 4 所示,其中电力的碳排放因子取自《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》,柴油的碳排放因子取自《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。

表 4 1 m³ 预拌混凝土生产阶段消耗的能源与碳排放量

项目	能源用量	碳排放因子	碳排放量/kgCO _{2e}
电量	2.38 kW·h	0.5810 kgCO _{2e} /(kW·h)	1.38
柴油	0.103 kg	3.13 kgCO _{2e} /kg	0.32

功能单位生产阶段碳排放按式(3)计算:

$$R_e = \sum_{i=1}^n G_i \times H_i \tag{3}$$

式中:R_e——预拌混凝土生产消耗能源碳排放总量,kgCO_{2e};

G_i——第 i 种预拌混凝土生产消耗能源用量,kg;

H_i——第 i 种预拌混凝土生产消耗能源碳排放因子,

kgCO_{2e}/kg。

1.2.4 废弃物处置阶段碳排放计算

生产过程中产生的废弃混凝土块通常经过处理后用作道

路填埋,利用了废弃物中的砂、石,降低了碳排放量,如表 5 所示。

表 5 生产 1 m³ 预拌混凝土产生的废弃物利用减碳量

处理用途	总量 /(kg/m³)	材料	用量 /(kg/m³)	碳排放因子 /(kgCO _{2e} /t)	碳减排量 /(kgCO _{2e} /m³)
道路水稳层	8.75	砂	3.32	2.51	0.008
		石	3.64	2.18	0.008
道路填埋	11.67	砂	4.43	2.51	0.011
		石	4.85	2.18	0.011

1.3 生命周期碳足迹计算

根据预拌混凝土碳排放系统边界(原材料获取、原材料运输、产品生产加工、生产废弃物处置),碳排放量按式(4)计算:

$$R_c=R_m+R_n+R_e-R_r$$
 (4)

式中: R_c ——功能单位预拌混凝土碳排放总量, kgCO_{2e};
 R_m ——预拌混凝土原材料获取阶段碳排放总量, kgCO_{2e};
 R_n ——预拌混凝土原材料运输阶段碳排放总量, kgCO_{2e};
 R_e ——预拌混凝土产品生产阶段碳排放总量, kgCO_{2e};
 R_r ——预拌混凝土废弃物处置碳排放总量, kgCO_{2e}。

根据式(4)以及各环节碳排放计算,可得 1 m³ 的 C15~C55 预拌混凝土生命周期碳排放量,如表 6 所示。

表 6 1 m³C15~C55 预拌混凝土全生命周期碳排放量 kgCO_{2e}

混凝土等级	原材料 获取	原材料 运输	产品 生产	废弃物 利用	碳排放量 合计
C15 泵送	128.00	26.28	1.71	0.0038	155.99
C15 非泵	126.82	26.51	1.71	0.0038	155.04
C20 泵送	162.31	26.93	1.71	0.0038	190.95
C20 非泵	158.37	26.39	1.71	0.0038	186.47
C25 泵送	190.46	27.47	1.71	0.0038	219.64
C25 非泵	196.08	26.80	1.71	0.0038	224.59
C30 泵送	243.58	27.90	1.71	0.0038	273.19
C30 非泵	229.97	27.96	1.71	0.0038	259.64
C35 泵送	261.41	27.94	1.71	0.0038	291.06
C35 非泵	255.09	28.61	1.71	0.0038	285.41
C40 泵送	290.00	28.39	1.71	0.0038	320.10
C40 非泵	288.81	28.54	1.71	0.0038	319.06
C45 泵送	321.79	28.52	1.71	0.0038	352.02
C45 非泵	312.16	29.21	1.71	0.0038	343.08
C50 泵送	366.64	28.40	1.71	0.0038	396.75
C50 非泵	352.68	29.83	1.71	0.0038	384.22
C55 泵送	380.07	30.06	1.71	0.0038	411.84
C55 非泵	376.94	30.46	1.71	0.0038	409.11

2 预拌混凝土碳足迹分析

2.1 生命周期预拌混凝土碳足迹分析

由表 6 全生命周期碳排放计算可得预拌混凝土各阶段碳排放贡献占比。可以看出,预拌混凝土全生命周期中碳排放占比最高的环节的在于原材料获取阶段,占比 81.8%~92.4%,这表明预拌混凝土在环境治理方面的较高贡献度。同时随着预拌混凝土强度等级的提高,其产生的碳排放量也随之提高,原材料获取阶段的碳排放贡献愈发突出,从表 1 各等级预拌混凝土原材料平均用量中不难看出,水泥用量的增大是导致这一现象最主要的因素。

2.2 各环节碳足迹分析

2.2.1 原材料获取阶段碳足迹分析

C15~C55 预拌混凝土水泥与机制砂碳排放占比如图 1 所示,外加剂、矿粉及其他原料碳排放占比如图 2 所示。

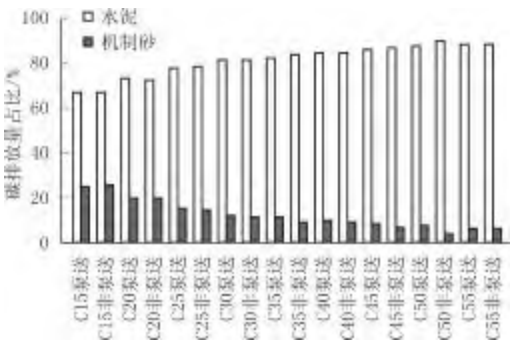


图 1 C15~C55 预拌混凝土水泥与机制砂碳排放占比

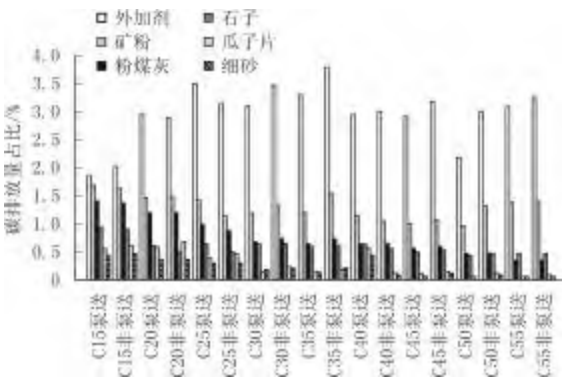


图 2 C15~C55 预拌混凝土外加剂、矿粉及其他原料碳排放占比

由图 1、图 2 可见,随着预拌混凝土强度等级的提高,水泥的碳排量占比由 66% 逐渐增大至 89%,机制砂的碳排量占

比由 26%逐渐减小至6%，外加剂碳排放量贡献占比在 1%~3%波动。以 C30 预拌混凝土为例，C30 预拌混凝土原材料获取阶段碳排放占比如表 7 所示。

表 7 C30 预拌混凝土原材料获取阶段碳排放占比 %

水泥	机制砂	外加剂	矿粉	粉煤灰	石子	瓜子片	细砂	水
81.19	12.77	3.10	1.21	0.69	0.65	0.19	0.19	0.01

由表 7 可见，水泥、机制砂、外加剂这 3 种原材料是影响预拌混凝土碳排放量最主要的因素，其中由于水泥的碳排放因子是其他原材料种类的 10 倍以上，因此水泥用量对整体碳排放量的敏感度最高。

2.2.2 原材料运输阶段碳足迹分析

C30(泵送)预拌混凝土原材料运输阶段碳排放贡献占比如表 8 所示。

表 8 C30(泵送)预拌混凝土原材料运输阶段碳排放占比 %

水泥	机制砂	外加剂	矿粉	粉煤灰	石子	瓜子片	细砂
8.50	16.56	0.54	1.71	2.58	51.35	14.62	4.13

经调研，原材料中砂、石质量对混凝土品质的影响较大，且这 2 种原材料用量较大，水泥仅次于第三位，混凝土生产企业通常会选用多家供货商，因此，砂、石、水泥的运输是影响原材料运输阶段的主要因素。此外，具备码头的企业通常会选用船运，而船运的碳排放因子远小于车运，这会使得采用车运的原材料会占据运输阶段碳排放的主导。

2.2.3 产品生产加工阶段碳足迹分析

预拌混凝土生产加工阶段消耗能源碳排放量电力占比 81%，柴油占比 19%。生产加工机械是电能消耗的主要来源，柴油消耗主要来源于厂内运输车辆，其他能源诸如氧气、乙炔（主要用于搅拌楼、生产线设备的维修与养护）总用量较少，占比不足0.01%，故不作考虑。

2.2.4 生产废弃物处置阶段碳足迹分析

生产废弃物处置环节减少了 0.001%~0.002%的碳排放量，通过固废再生的手段将废弃物混凝土块处理后作为道路水稳层或进行道路填埋，在降低废弃混凝土对环境污染的同时，又能够节约天然资源，虽然能够减少的碳排放量占比比较低，但是由于混凝土碳排放量基数较大，因此减碳量也相当可观。

3 预拌混凝土碳减排技术

3.1 低碳水泥技术

由预拌混凝土碳足迹数据分析可知，原材料获取环节碳排放占比 80%以上，为最主要的影响因素，而整个原材料获取环节中水泥碳排放贡献最大，同样占比 80%以上，故原材料获取环节主要碳减排手段主要分为 2 方面：一是在保证预拌混凝土性能、质量的前提下，尽可能减少水泥用量，直接降低因水泥产生的碳排放量；二是尽可能提高混凝土的耐久性、抗裂、抗腐蚀等性能，延长混凝土使用寿命，间接减少因混凝土修补、报废等产生的碳排放。主要包括：(1)提高粉煤灰、矿粉的用量占比；(2)发展再生骨料技术；(3)优化混凝土原材料配合比；(4)发展低碳胶凝材料。罗小东等^[6]研究通过胶材体系低碳化、配合比设计体系低碳化、生产及运输体系低碳化 4 个方面来实现混凝土的低碳化。

3.2 智能化节能设备降碳技术

预拌混凝土生产加工环节的碳排放量占比不超过 5%，在原材料及生产配合比相对确定的情况下，对于混凝土企业来说，可以通过优化混凝土生产系统、采用智能设备来减少产生的能源消耗，达到降碳的目的。电能、柴油消耗方面，通过节能设备选型、在配电系统中设置无功补偿，采用智能骨料输送技术、智能调度技术等手段实现节能降碳。同时可以通过引入光伏发电等可再生能源以及增加厂区绿化率等方式实现降碳。

3.3 C-USE 技术

混凝土生产企业自主研究了建筑工程材料中的碳利用和封存关键技术(Carbon Utilization and Storage in Engineering-materials, 简称 C-USE 技术)。C-USE 技术属于实现“双碳”目标重要技术路径之一 CCUS(碳捕获、利用和封存技术)中的重要一环，通过将产业链前端捕集到的液态二氧化碳有效注入混凝土拌合物中，经矿化反应形成以碳酸钙为主的多种新矿物，制成的固碳混凝土较普通混凝土强度可提高 5%~10%，节约水泥用量 10%~15%，从而实现二氧化碳的永久固化封存和高值化利用。曹伟达和武云鹏^[7]通过宏观以及微观试验，研究 CO₂ 对 C30 混凝土性能的影响及其作用机理，注入 CO₂ 后会使得混凝土水化诱导期缩短、水化产物增多、孔隙率降低、密实度提高，在工作性上即表现为凝结时间缩短和坍落度损失增大。

4 结 论

(1)强度等级为 C30、C35、C40 的泵送预拌混凝土的生命周期碳排放量分别为 273.19、291.06、320.10 kgCO_{2e}/m³，随着强度等级的增加，碳排放量不断提高，其主要原因是较高等级

的配合比中水泥用量的占比较大。生命周期碳排放中原材料获取阶段的碳排放量占比超过 80%,而原材料获取阶段中水泥产生的碳排放量占比超过 80%,因此,水泥是影响混凝土碳排放量最主要的因素。故选用低碳水泥或者减少水泥用量是降低预拌混凝土碳排量最直接有效的手段。

(2)根据预拌混凝土生命周期碳足迹分析,混凝土碳减排技术路径主要围绕以优化水泥等原材料为主,智能化生产、运输管理为辅。同时研发应用固封 CO₂ 技术等手段,进一步降低胶凝材料的碳排放量,提升预拌混凝土的性能,有效降低碳排放指标。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委.2021 年全国商品混凝土产量增长 6.9%^[EB/OL].<https://www.ccpa.com.cn/site/content/8544.html>.

- [2] Flower D J M, Sanjayan J G. Green house gas emissions due to concrete manufacture [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12 (5): 282-288.
- [3] 吴冰, 马超, 高美金, 等. 二氧化碳矿化预拌混凝土的碳排放分析及经济性评价[J/OL]. *洁净煤技术*, 1-9[2023-10-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20230615.1409.002.html>.
- [4] 樊庆铎, 敖红光, 孟超. 生命周期评价[J]. *环境科学与管理*, 2007 (6): 177-180.
- [5] 刘敬疆. 碳足迹与绿色建材[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [6] 罗小东, 张杰, 彭丙杰, 等. 预拌混凝土碳排放计算及低碳化技术路径分析与研究[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49 (8): 160-166.
- [7] 曹伟达, 武云鹏. CO₂ 对 C30 混凝土性能的影响及其作用机理[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49 (12): 22-26.



(上接第 119 页)

(3)在冬季低温混凝土施工中,对原材料进行保温,对拌合水进行加热,施工和养护期间,用电热膜、聚苯板对钢梁板底面进行保温,混凝土浇筑后,对混凝土表面用薄膜、电热板、棉被、篷布覆盖保温、加热。该保温和加热措施可有效保障严寒地区混凝土有效水化,是湿接缝混凝土施工的有效养护方法。

参考文献:

- [1] Qi R Q. Construction technology of expansion joint in micro exploration road and bridge construction[J]. *International Journal of Computational and Engineering*, 2020, 5 (2): 32-44.
- [2] Shi W Z, Shafei B, Liu Z Y, et al. Early-age performance of longitudinal bridge joints made with shrinkage-compensating cement concrete[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 1-11.
- [3] 李鹏, 苗苗, 马晓杰. 膨胀剂对补偿收缩混凝土性能影响的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35 (1): 167-173.

- [4] 陈诚, 郑鹏程, 陈绍龙, 等. 针对严寒地区负温环境中混凝土施工技术研究[J]. *施工技术*, 2017, 46 (S2): 531-537.
- [5] 郝磊, 韩建国, 阎培渝, 等. 严寒地区混凝土桥面伸缩缝施工养护方法探讨[J]. *混凝土*, 2018 (5): 138-142.
- [6] 张丰, 白银, 蔡跃波. 新型低温早强剂的制备与性能研究[J]. *水利水电工程学报*, 2020 (2): 36-45.
- [7] 宋超, 马淑琴, 师华. UEA 膨胀剂替代早强剂配制低温超早强混凝土[J]. *新型建筑材料*, 2015, 42 (6): 12-14.
- [8] 叶显, 吴文选, 侯维红, 等. 膨胀剂对高强灌浆料体积稳定性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21 (6): 950-955.
- [9] Jiang Z W, He B, Zhu X P, et al. Yi Zhang State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119-131.

