

[1]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[2024-11-19].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20230615.1409.002.html>.

二氧化碳矿化预拌混凝土的碳排放分析及经济性评价

吴冰¹, 马超², 高美金¹, 梁艳群¹, 王涛², 易臻伟²

(1.国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000; 2.浙江大学青山湖能源研究基地, 浙江 杭州 311305)

摘要: 预拌混凝土是当今世界最重要的混凝土产品之一, 二氧化碳矿化预拌混凝土技术兼具消纳二氧化碳和替代传统高耗能原料的双重减碳效益, 减排潜力巨大。本文采用广义“从摇篮到大门”的计算边界, 对比分析了传统生产方式预拌混凝土、CO₂矿化预拌混凝土和CO₂矿化深度耦合固废预拌混凝土三种生产情景的碳排放与经济效益评估, 只有当CO₂矿化与固废资源深度耦合才能发挥最大的减碳效益, 生产单位体积的混凝土可以减少75.04 kg CO₂排放。通过经济性分析, CO₂矿化技术在生产成本上有略微的优势, 随着未来碳交易市场的逐渐完善, CO₂矿化预拌混凝土发展前景将更加广阔。

关键词: 预拌混凝土; CO₂矿化; 全生命周期碳排放; 经济性评估

中图分类号: X075

文献标志码: A

Carbon Emission and Economic Evaluation of CO₂ Mineralization Ready-mixed Concrete

WU Bing¹, MA Chao², GAO Meijin¹, LIANG Yanqun¹, WANG Tao², YI Zhenwei²

(1.State Grid Zhejiang Electric Power Co., LTD., Economic and Technological Research Institute, Hangzhou 310027;

2.Qingshanhu Energy Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 311305)

Abstract: Ready-mixed concrete is one of the most important concrete products in the world. Carbon dioxide mineralized ready-mixed concrete technology has the dual carbon reduction benefits of absorbing carbon dioxide and replacing traditional high energy-consuming raw materials, and has great potential for emission reduction. Using the generalized calculation boundary of "from cradle to gate", this paper compares and analyzes the carbon emission and economic benefit evaluation of three production scenarios: traditional production mode ready-mixed concrete, CO₂ mineralization ready-mixed concrete and CO₂ mineralization deep coupling solid waste ready-mixed concrete. Only when CO₂ mineralization and solid waste resources are deeply coupled can the maximum carbon reduction benefit be brought into play, and the 75.04 kg CO₂ emission can be reduced by producing concrete per unit volume. Through economic analysis, CO₂ mineralization technology has a slight advantage in production cost. With the gradual improvement of carbon trading market in the future, the development prospect of CO₂ mineralization ready-mixed concrete will be broader.

Key words: Ready-mixed concrete; CO₂ Mineralization; Life cycle carbon emissions; Economic evaluation

基金项目:

作者简介: 吴冰 (1989—), 女, 浙江杭州人, 硕士, 主要研究方向为数字化电网, 绿色低碳变电站。E-mail: 381889806@qq.com

通讯作者: 王涛 (1980—), 男, 山东菏泽人, 教授, 主要研究方向为二氧化碳捕集与转化利用。E-mail: oatgnaw@zju.edu.cn

0 引言

近年来, 由温室效应引起的生态环境问题日益加剧。根据政府间气候变化专门委员会 IPCC^[1] 第一组第五次评估报告的内容, 近年来大气中温室气体浓度持续显著地上升, 其中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 这三类主要的温室气体的浓度达到了 800 年以来的最高水平。2020 年 9 月 22 日, 习近平总书记提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年实现碳中和”的双碳目标。2021 年, 我国二氧化碳排放总量超过 119 亿 t, 约占全球的 33%^[2]; 其中混凝土行业由于需要大量的水泥用量, 具有较大的二氧化碳减排压力。2020 年全球因为水泥的生产而产生的二氧化碳排放量达到了 23.77 亿 t, 其中中国贡献了 70% 的二氧化碳排放量^[2]。

根据发改委发布的 2021 年我国建材行业的运行情况报告, 国内预拌混凝土总产量为 32.93 亿 m³^[3], 是建筑业用量最大的混凝土产品之一。预拌混凝土属于高排放、高污染的行业, 对我国提出的“双碳目标”带来较大挑战。近年来, 为了实现预拌混凝土行业的脱碳目标, CO₂ 矿化混凝土技术被认为是最具潜力的技术路径之一。CO₂ 矿化预拌混凝土技术通过利用混凝土中的碱性组分与工业过程中捕集的 CO₂ 发生碳酸化反应, 将 CO₂ 转化为稳定的碳酸盐产物从而实现 CO₂ 的永久封存。CO₂ 矿化反应能够在不影响混凝土耐久性能的情况下有效提升力学性能, 使得混凝土生产过程中能够减少水泥用量。在此基础上, CO₂ 矿化混凝土技术还可与固废处理过程深度耦合, 实现碳减排的同时达到固废处置及资源化利用, 并得到高值化产品。我国每年产生大量的工业固废, 通过 CO₂ 矿化技术可以年处理超过 10 亿 t 的工业固废同时减排超过 1 亿 t 的 CO₂^[4], 兼具直接减排和间接减排效应, 综合减排潜力巨大。

然而目前为止关于混凝土行业的碳足迹研究和碳排放评估方法仍然比较模糊, 国内外关于碳排放评估主要有“投入产出法”、“IPCC 燃料排放计算法”和“生命周期评估法”等^[5]。其中基于生命周期理论的碳排放计算是对产品“从开始到结束”的整个寿命周期的计算方法, 考虑到的过程完整, 计算结果准确, 具有客观、可量化等优点, 在能源、建材、环境等领域得到了广泛的应用。同时, 随着国际社会对“碳交易”政策的逐步推进, 碳交易市场不断完善落实, CO₂ 矿化预拌混凝土技术不仅能给企业带来社会效益, 还能创造一定的经济效益。目前

对于 CO₂ 矿化预拌混凝土技术的经济性评估以及如何在保证减少碳足迹的前提下实现经济效益在现有的研究和报告中缺乏报道。

我国由于预拌混凝土的发展起步较晚, 对预拌混凝土的碳排放分析和经济性评价也缺乏研究和数据支持。因此, 本文通过设定传统预拌混凝土、CO₂ 矿化预拌混凝土以及 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土三种生产方式, 模拟具体生产情景计算三者的全生命周期碳排放以及各自的生产成本, 为预拌混凝土领域的碳排放和经济性分析提供参考, 并有针对性地针对预拌混凝土的绿色生产和减排方式提供建议。

1 全生命周期碳排放分析方法

全生命周期评价 life cycle assessment (LCA) 是一种调查和评估环境载荷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^[6]。对此, ISO 14040 环境管理评价标准规定: 全生命周期评价必须包括目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释^[7-8]。LCA 考虑的是产品的整个生命周期, 从原材料的提取和获取, 到能源和材料的生产 and 制造, 再到使用和结束生命的处理, 最后的处置或回收。在建筑和混凝土领域的环境影响评估和碳足迹分析中, LCA 也得到了广泛的应用。

1.1 计算边界

全生命周期评价首先需要确定计算边界, 计算边界决定了在 LCA 计算中包含哪些阶段。在混凝土领域的碳足迹研究中, 一般采取“从摇篮到大门 (Cradle-to-gate)”和“从摇篮到坟墓 (Cradle-to-grave)”作为计算边界。本文参考了 ISO 14040 和 ISO 14044 标准, 选取广义“从摇篮到大门 (Cradle-to-gate)”为计算边界, 以传统预拌混凝土、CO₂ 矿化预拌混凝土以及 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土作为研究对象, 考虑了预拌混凝土从原料生产、原料运输、搅拌生产、产品运输、施工上墙的全生命周期碳排放对比分析, 计算三种混凝土的温室效应值 (Global Warming Potential, GWP)。图 1 为全生命周期计算边界示意图。为了便于理解和区分, 同时给出了三种预拌混凝土的生产流程, 如图 2 所示。

根据温室气体议定书 (Greenhouse Gas Protocol)^[9] 的定义, 温室效应指数 GWP 是指在产品 100 年的寿命周期内, 各种温室气体所产生的温室效应折算成产生相同效应的 CO₂ 当量。基于

此，本文通过对比两种混凝土产品的 LCA-GWP 评价
 值对比分析碳排放，其中所用到的产品在生命周期
 中输入和输出的生命周期清单（Life Cycle Inventory, LCI）量化数据来自于 ecoinvent v3.8^[10]数据库。

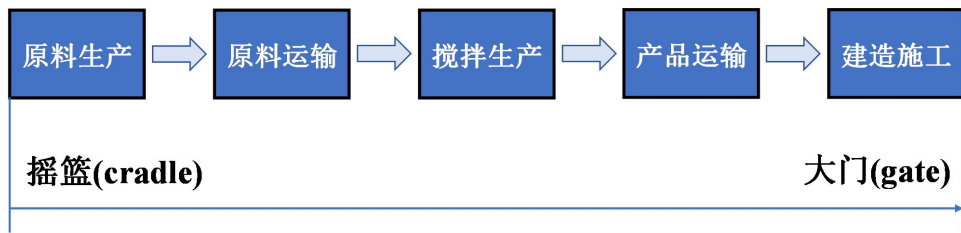


图 1 全生命周期计算边界示意图
 Fig.1 Schematic diagram of the boundary of life cycle calculation

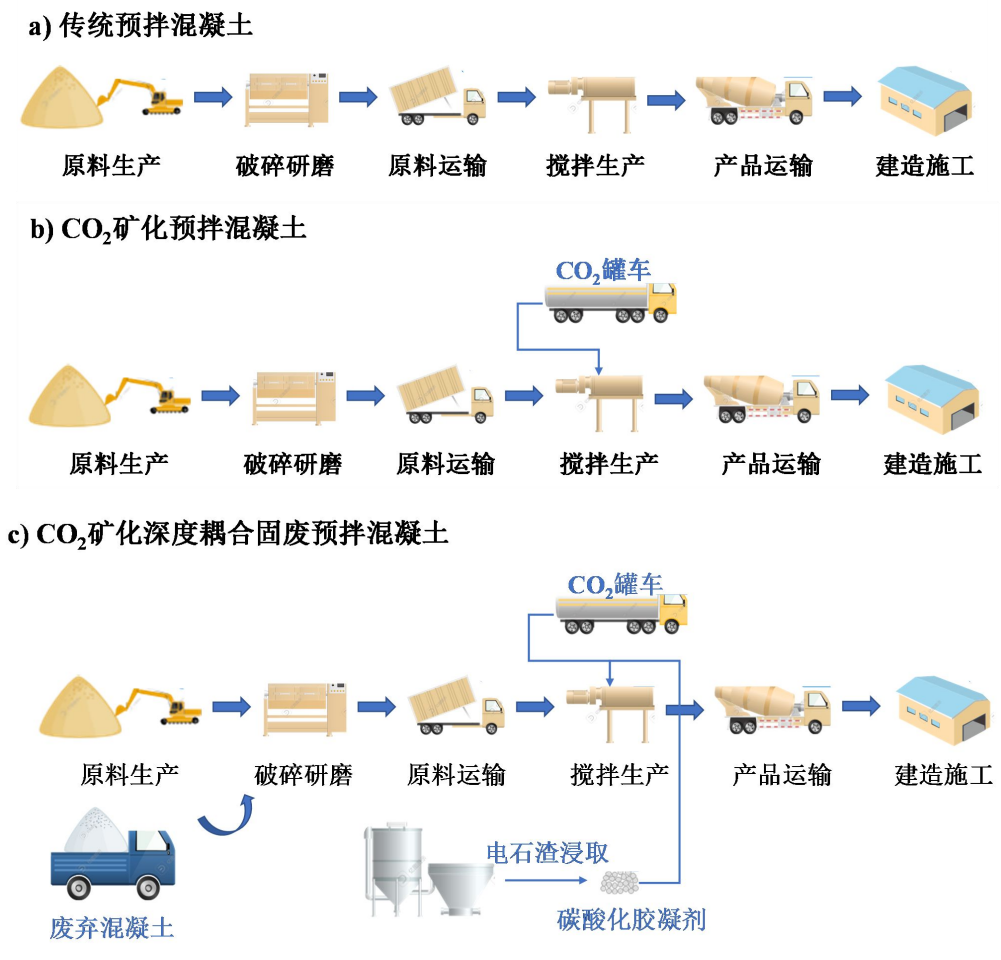


图 2 三种预拌混凝土生产流程
 Fig.2 Three production processes of ready-mixed concrete

1.2 预拌混凝土建筑碳排放计算方法

1.2.1 原材料生产阶段

本文关于混凝土配合比的数据来自于某地配备有 CO₂ 矿化设备的混凝土生产商，以 C30 混凝

土为例，表 1 给出了三种预拌混凝土的原材料种类及其每方混凝土中的质量。

表 1 三种预拌混凝土的配合比

Table.1 Mix ratio of three kinds of ready-mixed concrete

	传统预拌混凝土 (kg·m ⁻³)	CO ₂ 矿化预拌混凝土 (kg·m ⁻³)	CO ₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土 (kg·m ⁻³)
水泥	270	240	230
粉煤灰	50	60	40
矿粉	50	70	60
碎石	880	880	780
砂	880	880	300
再生骨料	0	0	680
减水剂	12	12	12
水	185	190	200
碳酸化胶凝剂	0	0	40

表 2 给出了不同种类原料的碳排放因子和相关的数据来源。其中水泥、矿渣、碎石、砂、和水的碳排放因子来自于 ecoinvent v3.8 数据库中的 LCI 数据。废灰的碳排放因子来自于梁永宸等^[11]的研究计算。本文研究的两种混凝土均采用聚羧酸类减水剂，其计算结果来自于陶然等^[12]的研究。CO₂ 由于得到了永久的封存且在混凝土生产过程中忽略逃逸的 CO₂，因此其碳排放因子取值为-1。碳酸化胶凝剂的主要成分为 CaCO₃，由电石渣浸取液（主要为氢氧化钙溶液）与 CO₂ 的反应得到，该过程相当于永久封存了 CO₂，考虑到电石渣的浸取效率和能耗，其碳排放因子取值为-0.4。

表 2 不同种类原料的碳排放因子

Table.2 Carbon emission factors of different kinds of raw materials

原料种类	碳排放因子 (kg-CO ₂ ·kg ⁻¹)	数据来源
水泥	0.86057	数据库
废灰	0.00581	Chen et al.
矿渣	0.0047614	数据库
砂	0.01172	数据库
石	0.008142	数据库
废弃混凝土	0.008321	数据库
聚羧酸减水剂	3.42	Tao et al.
水	0.000329	数据库
CO ₂	-1	/
碳酸化胶凝剂	-0.4	/

原材料生产阶段的碳排放计算公式如下：

$$(1)$$

式中： R ——原材料生产阶段的碳排放量；

m_i ——第 i 种原料的质量；

E_i ——第 i 种原料的碳排放因子。

1.2.2 原材料运输阶段

表 3 列举了混凝土所需的原材料供应商与混凝土生产商的运输距离。为了减少由于原材料供应商变化导致的计算结果不一致，本文规定该预拌混凝土生产商采购的每种类型原材料出自同一供应商。原材料采用陆运的运输方式，忽略不同载具运输带来的计算误差，本文规定载具均为载重量为 32 吨的半挂牵引式重型货车，百公里油耗量为 32L 柴油，液态二氧化碳罐车的百公里油耗为 40L 柴油，柴油的碳排放因子根据全球平均排放量计算得到，其值为 2.73 kg-CO₂/L。

表 3 各原料的运输距离

Table.3 Transportation distance of each raw material

原料种类	运输距离(km)
水泥	30
废灰	95
废渣	100
砂	50
碎石	85
废弃混凝土	75
液态二氧化碳	100

原材料运输阶段的碳排放计算公式如下：

$$(2)$$

式中： T ——原材料运输阶段的碳排放量；

m_i ——第 i 种原料的质量；

L_i ——第 i 种原料的运输距离；

e_i ——第 i 种原料单位质量通过半挂卡车运输单位距离的碳排放量。

1.2.3 搅拌生产阶段

预拌混凝土在搅拌生产阶段主要来自于工厂内的电能，根据预拌混凝土生产商提供的实测数据，每方混凝土生产的电耗为 3.6 kWh。在 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土生产过程中还需要考虑

到再生骨料的生产能耗，主要来自于破碎研磨的电耗，大约为 29.11 kWh/m³。本文根据华中地区电网综合排放系数^[13]获取电力的碳排放因子为 0.581 kg-CO₂/kWh。二氧化碳矿化预拌混凝土技术可以封存 0.5%混凝土质量的 CO₂。二氧化碳深度耦合固废技术由于添加了碳酸化胶凝剂，优化了混凝土内的孔隙通道，有助于固碳率的提高，可以实现混凝土质量 1%的二氧化碳封存。

搅拌生产阶段的碳排放量计算公式如下：

(3)

式中： S ——搅拌生产阶段的碳排放量；

M ——单方混凝土生产电耗；

E ——电力碳排放因子；

C ——单位体积混凝土中封存的 CO₂ 质

量。

1.2.4 产品运输阶段

产品运输阶段的碳排放主要来自于混凝土搅拌车将生产出的混凝土产品运送至施工现场所需的油耗。最常见的混凝土罐车规格容量为 12 方，其百公里油耗为 35L 柴油。

产品运输阶段的碳排放量计算公式如下：

(4)

式中： T ——产品运输阶段的碳排放量；

m ——混凝土质量；

L ——产品的运输距离；

e ——单位质量混凝土运输单位距离的

碳排放量。

1.2.5 建造施工阶段

建造施工阶段的碳排放应该根据工程预算书进行计算，按照预算书中的施工计划得到该建筑所包含的施工机械种类、机械的工作运行时间等，根据每种施工设备的单位碳排放计算。由于每种类型的建筑涉及到的施工设备不一，且施工过程中还存在外界因素导致的临时更改（如班次的调整、天气原因影响的施工进度等），因此为了统一该阶段的碳排放计算，本文查阅了相关文献资料^[4]，根据前人的研究结果，汇总了部分房屋类型在建筑施工阶段的相关数据及对应的碳排放总量，如表 4 所示。

建筑施工阶段的碳排放量计算公式如下：

(5)

式中： C ——建筑施工阶段的碳排放量；

m ——单位建筑面积的混凝土用量；

E ——单位建筑面积的 CO₂ 排放量；

A ——建筑面积。

表 4 部分房屋建筑施工阶段的相关数据

Table.4 Relevant data of some buildings in the construction

房屋类型	建筑面积/m ²	stage	
		施工/(kg·m ⁻²)	CO ₂ 排放总量/(kg·m ⁻²)
15 层住宅	4443.30	8.44	404.98
高层钢混楼房	2103.88	114.00	650.90
12 层钢混住宅	3276.54	13.99	367.89
15 层住宅	4443.30	38.40	382.40
17 层住宅	17558.72	53.33	476.80
(剪力墙结构)			
17 层住宅	17558.72	45.99	429.04
(配筋砌块)			
平均碳排放量		45.69	452.00

1.3 预拌混凝土生产成本计算方法

表 5 列举了全生命周期中所涉及到的资源类型和价格，价格统计于市场均价。其中，碳酸化胶凝剂来源于电石渣浸取微细碳酸钙工艺，其生产成本为 308 元/吨^[15]。

预拌混凝土的全生命周期成本（Life Cycle Cost, LCC）计算如下式：

(6)

式中： c ——预拌混凝土生产成本；

X_i ——生产单位体积混凝土中第 i 种资源的值；

Y_i ——生产单位体积混凝土中第 i 种资源的价格。

表 5 全生命周期中所有资源的市场均价

Table.5 Market average price of all resources in the whole life

资源类型	cycle	
	价格	单位
水泥	330	元/吨
废渣	80	元/吨
废灰	90	元/吨
矿粉	245	元/吨
砂	43	元/吨
碎石	18.5	元/吨
废弃混凝土	15	元/吨
水	4.1	元/m ³
减水剂	2400	元/吨
电力	0.5	元/kWh
二氧化碳	260	元/吨

柴油	7.8	元/L
碳酸化胶凝剂	308	元/吨

2 全生命周期碳排放分析

本节以传统预拌混凝土、CO₂矿化预拌混凝土和CO₂矿化深度耦合固废预拌混凝土为研究对象,选取配筋砌块结构的17层民用住宅为模拟情景,计算了“从摇篮到大门”为边界的全生命周期碳排放,对比分析了三种生产方式的预拌混凝土建筑从原材料生产、建材运输、混凝土搅拌生产、产品运输、建造施工五个阶段下的具体碳排放数值和分配比例,并通过设定不同的情景案例进行了敏感性分析,得到影响碳排放的关键因素,并给出低碳绿色混凝土建筑的发展建议。

2.1 碳排放影响因素分析

图3整合了三种生产方式的预拌混凝土全生命周期碳排放值,从图中可以看出,传统方式生产的预拌混凝土全生命周期碳排放值高达428.24 kg-CO₂/m³,绝大部分来自于原料生产和建筑施工阶段,而原料中水泥的生产加工是最主要的排放来源。在运输阶段和搅拌生产阶段带来的CO₂排放微乎其微,这同时也说明了预拌混凝土在生产效率、环境治理方面的优势。

CO₂矿化技术生产的预拌混凝土相比于传统方式,单位体积减少了37.6kg的CO₂排放,减幅为8.8%。主要的贡献来自于原材料碳排放的减少,CO₂矿化技术能够在保证预拌混凝土力学性能和耐久性能的前提下减少水泥的用量,在原材料生产阶段单位体积的混凝土减少了25.66 kgCO₂的排放,减幅为8.9%,占总减碳量的68.2%。

然而,仅仅依靠CO₂矿化技术所带来的减碳效益较为有限。在使用CO₂矿化技术的同时深度耦合固废资源具有更为可观的减排效果。在该生产方式中,除了使用部分粉煤灰、矿粉等工业固废作为胶凝材料替代水泥,还采用废弃混凝土生产的再生骨料替代部分的砂石,在骨料的生产过程中减少了11.1%的CO₂排放。由于原材料中增加了废弃混凝土的运输,因此该生产方式在原料运输阶段的GWP值最大,然而从产品的全生命周期流程来看,使用废弃混凝土依然带来了正向效果。不仅如此,CO₂矿化深度耦合固废预拌混凝土还利用电石

渣浸取液与CO₂发生碳酸化反应生产碳酸化胶凝剂,这种有益助剂不仅本身具有负碳效益,还能提高CO₂矿化反应的固碳效率,提高预拌混凝土的CO₂封存量,相比于单纯的CO₂矿化技术,在气源排放阶段的负碳效益提高了一倍。CO₂矿化深度耦合固废预拌混凝土与传统方式相比,单位体积减少了75.04 kgCO₂的排放,减幅高达17.5%。

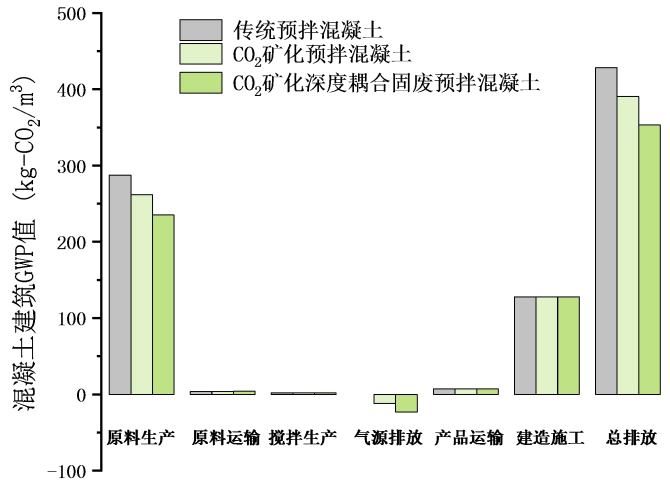


图3 两种混凝土各阶段下的碳排放计算结果对比

Fig.3 Comparison of carbon emission calculation results of two kinds of concrete at different stages

2.2 敏感性分析

由于单一的分析场景具有局限性,且考虑到在实际生产过程中存在着技术条件和生产场景等变化,因此本节设置了四种敏感性分析情景,考虑固废替代水泥量的改变、工厂建厂地点选择、固碳能力以及施工过程碳排放变化对预拌混凝土全生命周期碳排放的影响。敏感性分析情景设置如下:

CASE-1: 原材料生产过程GWP增加(1A)或减少一倍(1B)。

CASE-2: 原材料运输距离增加(2A)或缩短一倍(2B)。

CASE-3: CO₂封存能力提高(3A)或降低一倍(3B)。

图4给出了三个敏感性分析情境下传统预拌混凝土、CO₂矿化预拌混凝土以及CO₂矿化深度耦合固废预拌混凝土的GWP变化。如图4(a)所示,可以看出不论是否采用CO₂矿化技术,对于预拌混凝土产品而言,原材料的GWP变化对全生命周期碳排放具有十分明显的影响。由2.1节的分析可知,原材料的GWP在预拌混凝土生产过程中占有绝对的比例(80%)。因此,减少原材料生产过程的碳排放、减少预拌混凝土配比中水泥的含量

或是采用清洁能源进行原料生产仍然是预拌混凝土绿色低碳混凝土化最为有效的方法。

如图 4 (b) 所示, 原料运输距离的变化对预拌混凝土全生命周期碳排放影响较小, 这是因为原料运输阶段所产生的碳排放本身较低。然而对于 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土来说, 原料运输距离的变化相对比较敏感。这是因为该生产方法需要更多的固废, 在搅拌站选址时应该根据当地的固废资源情况合理安排。

如图 4 (c) 所示, CO₂ 的封存能力对预拌混凝土全生命周期碳排放影响较大。尤其是 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土, 对该指标十分敏感。根据 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土的生产工艺, 由于在搅拌过程中另外加入了碳酸化胶凝剂, 该助剂能够提高 CO₂ 的矿化反应效率, 因此相比于单纯的 CO₂ 矿化技术, 其对 CO₂ 的吸收能力更强。并且 Wang 等人^[16]的研究指出, 生产工艺改进对固碳率的提升仍然有很大的空间。由此启发我们, 开发更高效的低碳助剂或提高 CO₂ 矿化过程的反应效率值得进一步研究。

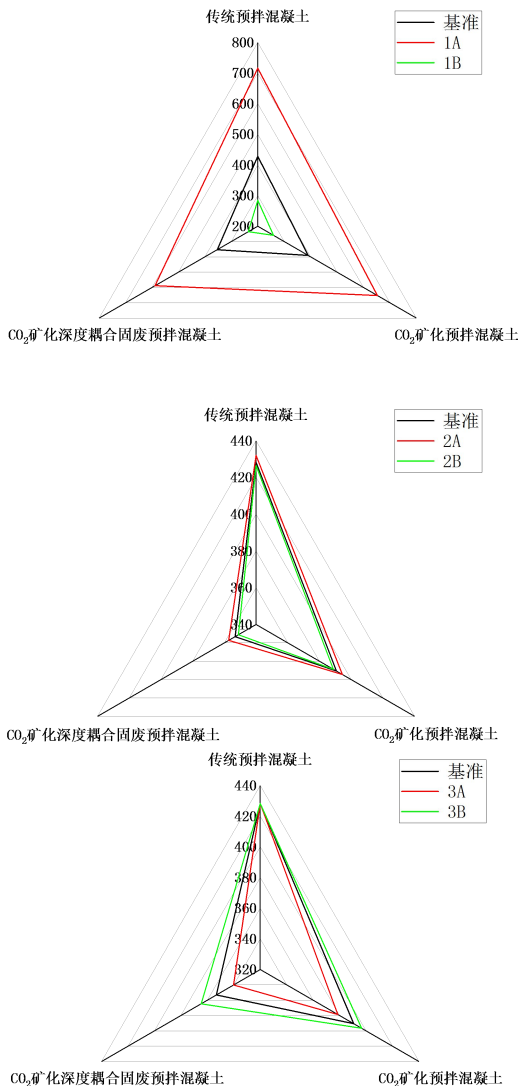


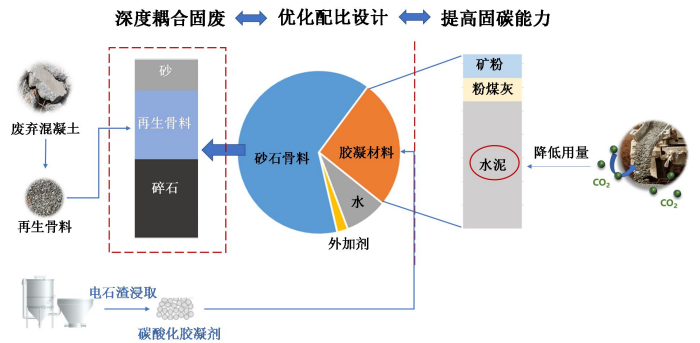
图 4 三种敏感性分析情景下预拌混凝土的 GWP 变化

Fig.4 GWP changes of ready-mixed concrete under three sensitivity analysis scenarios

综合以上两节的分析, 我们从环境效益角度给出了预拌混凝土的发展建议, 如图 5 所示。合理设计混凝土级配, 优化配方是减碳的关键与核心, 粉煤灰、矿粉等活性工业固废已经得到了生产厂家广泛的使用, 目的是尽量降低配比中水泥的占比。CO₂ 矿化技术与固废资源的深度耦合为预拌混凝土的减碳提供了一条更为有效的途径。CO₂ 矿化技术通过与混凝土中碱性物质的碳酸化反应强化其力学性能, 并不损害耐久性, 因此可以在保证产品性能的前提下减少水泥用量。生产商可以考虑优化搅拌器内的流场或采用辅助固碳助剂等措施提高矿化反应效率。同时, 预拌混凝土的生产还能更深入的与固废资源结合。将废弃混凝土通过矿化技术生产再生骨料、通过电石渣浸取液与 CO₂ 发生碳酸化反应制备辅助胶凝材料等手段, 在制备过程以及混凝土的生产过程都能起到减碳效益。

图 5 预拌混凝土减碳路径

Fig.5 Carbon reduction path of ready-mixed concrete



3 经济性评估

本节将传统预拌混凝土、CO₂ 矿化预拌混凝土和 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土的生产成本进行计算对比, 并考虑了 CO₂ 矿化预拌混凝土技术在未来政策扶持的情况下的附加效益。

3.1 成本对比

图 6 显示了三种方式生产的预拌混凝土的分项以及总成本。从总成本来看, CO₂ 矿化技术取得了略微的成本优势, 虽然 CO₂ 矿化技术可能会带来运输以及气源成本的增加, 但是相比较于矿化技术减少的水泥用量带来的经济效益, 其余部分的成本增加可以忽略不计。预拌混凝土的生产成本主要

来自于原材料，而原材料中一半的成本来自于水泥的价格，因此降低原材料成本将是预拌混凝土生产商提升经济效益的关键。在未来，诸如提高 CO₂ 矿化反应效率、开发新型低碳胶凝材料或者设计固废基胶凝材料占比更高的混凝土配比等将是预拌混凝土生产商可以参考的策略和方向。这些措施不仅能够带来可观的减碳效益，还能降低搅拌站的生产成本。

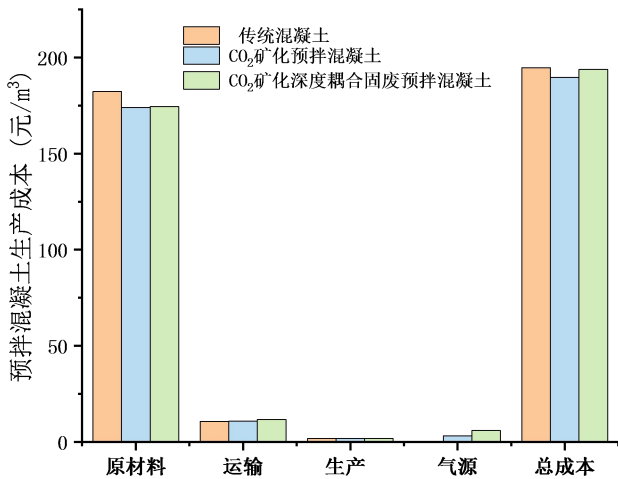


图6 三种混凝土生产成本计算结果对比

Fig.6 Comparison of calculation results of production cost of three kinds of concrete

3.2 附加效益分析

针对 CO₂ 矿化预拌混凝土技术，考虑到未来政府的扶持和碳交易制度的完善，分析了三种情景下该技术生产的预拌混凝土的潜在效益，分别是市场价提升 10%、计入 0.05 元/kg 的碳交易以及气源价格降低一半，计算结果如图 7 所示。从成本变动结果来看，以上三种情形均有利于 CO₂ 矿化预拌混凝土经济效益的提升，其中市场价格的提升带来的潜在效益最为明显，在市场价格提升 10% 的条件下，每公斤预拌混凝土可以增加 30 元利润。随着“双碳”政策的不断深入推行，CO₂ 矿化预拌混凝土技术可能存在更多方面的附加效益。

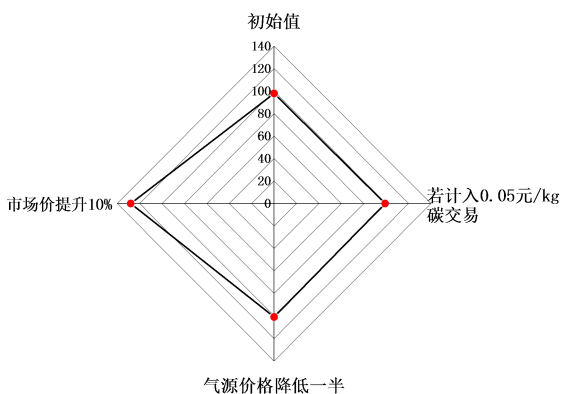


图7 CO₂矿化预拌混凝土技术附加效益分析

Fig.7 Additional benefit Analysis of CO₂ mineralized ready-mixed concrete Technology

4 结 论

本文以传统生产方式的预拌混凝土、CO₂ 矿化技术生产的预拌混凝土和 CO₂ 矿化深度耦合固废预拌混凝土为研究对象，详细计算对比了三种预拌混凝土产品从原材料的生产到建筑物施工阶段的全生命周期碳排放，并比较了三种生产方式的预拌混凝土的成本以及潜在的经济效益，为预拌混凝土领域的碳排放计算和市场分析提供参考，并对预拌混凝土的绿色低碳发展提供具体措施建议。主要的结论和展望如下：

1) 预拌混凝土的碳排放主要来源于原材料的生产阶段，CO₂ 矿化技术由于能够在保证混凝土强度的前提下有效减少水泥用量，因此降低了原料生产阶段的碳排放。然而，单一依靠矿化技术所带来的减碳效益并不显著，CO₂ 矿化技术与固废资源的深度耦合通过废弃混凝土生产再生骨料、电石渣制备胶凝材料进一步提升了减碳效益。与传统预拌混凝土相比，CO₂ 矿化技术深度耦合固废预拌混凝土能够产生 75.04 kg-CO₂/m³ 的 GWP 减量。

2) CO₂ 矿化技术并不会带来预拌混凝土生产成本的增加，相反在总生产成本上显现出了略微的优势。

3) 在未来碳交易制度趋于完善、二氧化碳价格降低、绿色低碳混凝土市场更加广阔条件下，CO₂ 矿化预拌混凝土将会有更好的经济效益，每方预拌混凝土的利润存在 30% 以上的提升空间。

综上所述，CO₂ 矿化技术不仅能够有效减少预拌混凝土生产施工过程的碳足迹，还具有潜在的经济性优势。发展低碳绿色预拌混凝土需要更深入地对 CO₂ 矿化技术进行研究，进一步提升预拌混凝土的性能或更多地替代传统高耗能、高排放的胶凝材料。另外，低碳混凝土的发展还需要更多的政策扶持以及国内外碳交易市场的完善。

参考文献 (References) :

[1]沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土 [J], 2013 35: 1068-1076.

Shen Yongping, Wang Guoya. The latest scientific points of the fifth assessment report of IPCC working Group on global climate

change. *Glacier and permafrost* [J], 2013 35: 1068-1076.

[2]Iea. *Energy Technology Perspectives 2021*[R]. IEA, 2021.

[3] 发改委：2021年全国商品混凝土产量增长6.9%。<https://www.ccpa.com.cn/site/content/8544.html>.

National Development and Reform Commission: the national output of commercial concrete will increase by 6.9% in 2021.<https://www.ccpa.com.cn/site/content/8544.html>.

[4]黄浩. 基于水化惰性胶凝材料的CO₂矿化养护建材机制研究 [D]. 浙江大学: 2019.

Huang Hao. Study on the mechanism of CO₂ mineralization curing building materials based on hydrated inert cementitious materials [D]. Zhejiang University: 2019.

[5]董雪, 柯水发. 国内外碳足迹计算方法、评估标准及研究进展[C]//绿色经济与林业发展论——第六届中国林业技术经济理论与实践论坛. 中国江西赣州,2012:8.

Dong Xue, Ke Shuifa. Calculation methods, Evaluation criteria and Research Progress of carbon footprint at Home and abroad [C]//Theory of Green economy and Forestry Development-- the sixth China Forum on Forestry Technology and economy Theory and practice. Ganzhou, Jiangxi, China, 2012:8.

[6]樊庆铨, 敖红光, 孟超. 生命周期评价. *环境科学与管理* [J], 2007: 177-180.

Fan Qingzi, ao Hongguang, Meng Chao. Life cycle assessment. *Environmental Science and Management* [J], 2007: 177-180.

[7]ISO 14040:2006,Environmental management-Life cycle assessment - Principles and framework[S].

[8]ISO 14040:2006,Environmental management-life cycle assessment -Requirements and guidelines[S].

[9]Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (version 1.0): Greenhouse Gas Protocol, 2013.

[10]Ecoivent. *The Life Cycle Inventory Data Version 3.8*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2021.

[11]梁永宸, 石膏爽, 张聪, 张滔, 王晓琪. 粉煤灰地聚物混凝土性能与环境影响的综合评价. *材料导报* [J], 2023 37: 82-87.

Liang Yongchen, Shi Xiaoshuang, Zhang Cong, Zhang Tao, Wang Xiaoqi. Comprehensive evaluation of performance and environmental impact of fly ash geopolymer concrete. *Material Guide* [J], 2023 37: 82-87.

[12] 陶然. 萘系和聚羧酸系减水剂环境协调性评价 [D]. 北京工业大学: 2018.

Tao ran. Evaluation of environmental coordination of naphthalene and polycarboxylate superplasticizers [D]. Beijing University of Technology: 2018.

[13] 国家气候战略中心. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[R]. 2019.

National Climate Strategy Center. 2019 emission reduction project China regional grid baseline emission factor [R]. 2019.

[14] 王凤来, 朱飞, 张孝存, 王海云. 哈尔滨17层住宅结构方案对比与碳排放分析. *哈尔滨工业大学学报* [J], 2014 46: 11-15.

Wang Fenglai, Zhu Fei, Zhang Xiaocun, Wang Haiyun. Comparison of structural schemes and carbon emission analysis of 17-storey residential buildings in Harbin. *Journal of Harbin Institute of Technology* [J], 2014 46: 11-15.

[15]Zhang T., Chu G., Lyu J., Cao Y., Xu W., Ma K., Song L., Yue H., Liang B. CO₂ mineralization of carbide slag for the production of light calcium carbonates. *Chinese Journal of Chemical Engineering* [J], 2022 43: 86-98.

[16]Wang T, Yi Z, Song J, et al. An industrial demonstration study on CO₂ mineralization curing for concrete [J]. *iScience*, 2022, 25(5): 104261.