

基于 LCA 绿色混凝土碳排放计算与不确定分析

甄映红, 岑晓倩, 张亚庆

(凯里学院 建筑工程学院, 贵州 凯里 556011)

摘要: 为了实现“双碳”目标, 减少混凝土二氧化碳排放量是非常有必要的。以含有磷矿渣和粉煤灰的混凝土作为研究对象, 基于生命周期评价法(LCA)构建混凝土生命周期碳排放评价模型, 采用蒙特卡罗模拟对混凝土生命周期碳排放进行了不确定性分析。结果表明: 强度为 C70、C40 和 C30 混凝土的生命周期碳排放分别为 399.85、297.02 和 239.85 kg/m³, 混凝土的碳排放随着强度的增加而增加, 碳排放最高的过程是原材料的生产阶段, 即原材料内含能, 主要来源于水泥的内含能, 高达 85%, 因此水泥的含量对混凝土碳排放的影响起决定性作用。混凝土生命周期的碳排放不确定性较合适, 不确定性为(-20.86, 20.83), 其中原材料生产阶段碳排放的不确定性偏大, 主要原因是原材料清单数据的获取不确定性较大。3 种强度混凝土的碳排放的不确定性几乎一致, 均来自混凝土原材料的碳排放因子。研究结果有助于混凝土的生命周期碳排放评价更准确, 也有利于混凝土产业的低碳发展。

关键词: 绿色混凝土; 生命周期评价(LCA); 碳排放; 不确定分析

中图分类号: TU755

文献标识码: A

文章编号: 1674-9944(2023)12-0186-08

DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2023.12.023

Carbon Emission Calculation and Uncertainty Analysis of Green Concrete Based on Life Cycle Assessment

Zhen Yinghong, Cen Xiaoqian, Zhang Yaqing

(Kaili University, Kaili, Guizhou 556011, China)

Abstract: In order to achieve the "double carbon" goal, it is very necessary to reduce the carbon dioxide emissions of concrete. In this paper, the concrete containing phosphorus slag and fly ash is taken as the research object, and the life cycle carbon emission assessment model of concrete is established based on the life cycle assessment method (LCA). Monte Carlo simulation is used to analyze the uncertainty of the life cycle carbon emission of concrete. The results show that: the life cycle carbon emissions of concrete with the strength of C70, C40 and C30 are 399.85 kg/m³, 297.02 kg/m³ and 239.85 kg/m³, respectively. The carbon emissions of concrete increase with the increase of strength, and the highest carbon emission process is the production stage of raw materials. That is, the energy contained in raw materials. It mainly comes from the energy content of cement, up to 85%, so the cement content plays a decisive role in the influence of concrete carbon emissions. The uncertainty of carbon emission in concrete life cycle is more appropriate, and the uncertainty is (-20.86, 20.83). The uncertainty of carbon emission in the production stage of raw materials is larger, mainly due to the large uncertainty of obtaining raw material inventory data. The uncertainty of carbon emission of the three kinds of concrete is almost the same, which all come from the carbon emission factor of the concrete raw materials. This study is helpful for more accurate assessment of carbon emission in concrete life cycle, and also conducive to the low-carbon development of concrete industry.

Key words: green concrete; life cycle assessment; carbon emission; uncertainty analysis.

收稿日期: 2023-05-06

基金项目: 凯里学院博士专项课题(编号: BS202003); 黔东南州科技计划项目(编号: 黔东南科合 J 字[2022]63 号)

作者简介: 甄映红(1972-), 女, 教授, 研究方向为土木工程材料。

1 引言

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划纲要》提出要加快绿色低碳发展,降低碳排放强度,争取 2030 年实现“碳达峰”,2060 年实现“碳中和”^[1]。建筑业是碳排放的主要产业之一,混凝土是目前使用最广泛的建筑材料,从原材料生产阶段到混凝土生产过程中会排放大量的 CO₂,占建筑总排放量的 82%,我国建材的能耗占比在全国能耗占比中达到 39.5%^[2]。随着我国城市建设和基础设施的增加,混凝土产量也在逐年增加,社会越来越关注混凝土对环境产生的影响^[3]。混凝土生命周期环境影响,尤其是对碳排放量的分析、评价,对于实现混凝土可持续发展非常重要。近年来,随着土木工程的发展和环境工程的研究不断深入,越来越多的学者将混凝土碳排放评价作为研究对象^[4,5]。绿色混凝土是将部分工业废渣取代水泥,不仅可以实现工业固废再循环利用,而且减少水泥用量,降低混凝土的碳排放,如 Flower 等^[6]研究表明,用粉煤灰代替 25% 的普通硅酸盐水泥可以使强度为 25 MPa 和 30 MPa 的混凝土温室气体排放分别降低 13% 和 15%。Kim 等^[7]通过 800 组混凝土配合比的对比,强度分别为 18、21 和 24 MPa 的混合比中,添加粉煤灰和高炉炉渣使混凝土 CO₂ 排放量分别减少了 25%、29% 和 26%。但当前并未形成统一有效的评价方法,如何更加高效达到研究效果还处于探索阶段。借鉴相关研究成果,将生命周期评价理论应用于混凝土碳排放评价更加系统,逻辑性更强。为了实现“双碳”目标,减少混凝土 CO₂ 排放量是非常有必要的。但是生命周期评估(life cycle assessment, LCA)是一种包含大量数据的分析方法,存在着许多的假设和各种不确定性。相关的确定性决策缺乏对不确定性的考虑^[8]。

因此,大部分学者对混凝土生命周期环境影响的不确定性进行分析,Zhang 等^[9]对某混凝土桥梁进行了 LCA 分析,考虑了 LCA 选择而产生不确定性。Panesar 等^[10]分析了功能单元的选择对绿色混凝土的生命周期评估影响,研究了 6 种不同功能单位(体积、抗压强度、混凝土耐久性、黏结剂强度等综合因素)对混凝土环境的影响。Zhang 等^[11]分别采用蒙特卡罗模拟法和情景分析法研究了参数不确定性和功能单元选择不确定性。

本文基于 LCA 构建混凝土生命周期碳排放评价模型,并进行不确定分析,有助于混凝土的生命周期碳排放评价更准确,也有利于混凝土产业的低碳发展。

2 混凝土碳排放计算

混凝土碳排放计算主要采用 LCA,是一种定性和定量的评价方法,是产品在其整个生命周期内的输入、输出和潜在环境影响的编制和评估,是对具体产品生命周期中所包含的复杂过程进行环境建模的一种有用方法^[12]。

2.1 计算边界

混凝土生命周期碳排放计算模型的构建主要 LCA。LCA 是产品在其整个生命周期内的输入、输出和潜在环境影响的编制和评估,包括确定目标和范围定义、清单分析、影响评价、结果解释等 4 个步骤^[13]。本文的生命周期碳排放评价对象为混凝土,研究处于材料层面,以“从摇篮到大门”作为系统边界,即包含原材料生产阶段、原材料运输阶段和混凝土生产阶段等 3 个阶段,输入物质主要为水泥、骨料、水、粉煤灰、磷矿渣等原材料以及运输阶段和生产阶段中消耗的油和电;输出物质主要指 CO₂。混凝土生命周期的范围如图 1 所示。

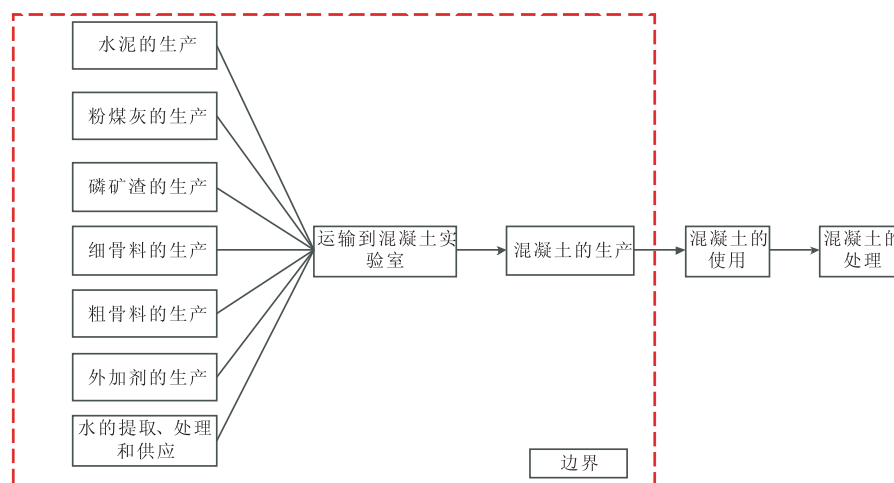


图 1 混凝土生命周期碳排放研究边界

功能单位是生命周期评价体系中衡量产品输入输出的量度。为了准确、透明地比较 LCA 结果,确定功能单元时必须考虑一致性。本文选用 1 m³混凝土作为功能单位,LCA 的结果一定是生产 1 m³混凝土所需的资源和能源消耗量、CO₂ 的排放和成本,即混凝土生命周期评价的碳排放量的功能单位是 kg/m³,混凝土生命周期评价的成本的功能单位是元/m³。

2.2 混凝土碳排放计算

基于 LCA 混凝土 CO₂ 排放的评估主要包括原材料生产、运输和混凝土生产过程阶段所产生 CO₂ 排放。混凝土原材料生产阶段主要涉及各种原材料生产过程的碳排放量^[14],包括水泥、粉煤灰、磷矿渣、粗骨料、细骨料、减水剂等生产和制造过程的碳排放;材料运输阶段主要涉及原材料运输到实验室所采用运输工具消耗的柴油、汽油等能源产生的碳排放量;混凝土生产过程阶段主要涉及在实验室进行混凝土搅拌、浇筑和养护消耗电力所产生的碳排放量^[15]。因此,具体 CO₂ 排放量可分别表示为式(1)。

$$CO_2 = CO_{2-m} + CO_{2-t} + CO_{2-c} \quad (1)$$

式(1)中,CO_{2-m}为材料生产阶段的 CO₂ 排放量,CO_{2-t}为物料运输过程中 CO₂ 的排放量,CO_{2-c}为施工阶段的 CO₂ 排放量。

2.2.1 原材料生产阶段

在原材料生产阶段,与混凝土生产所需材料(水泥、骨料和外加剂)的 CO₂ 排放是根据每种材料的单位 CO₂ 碳排量来计算的。计算是基于 1 m³混凝土产品的中所包含的每种材料的生产量。根据《建筑碳排放计量标准》,在评价材料生产过程中产生的 CO₂ 排放时,需要考虑 CO₂ 的排放因子和材料数量,计算公式如式(2)。

$$CO_{2-m} = \sum (Q_i \times EF_i) \quad (2)$$

式(2)中,Q_i为材料量(i)(t),EF_i为材料(i)排放因子(kgCO₂/t)。

2.2.2 原材料运输阶段

运输阶段消耗大量能源,并产生大量温室气体。计算原材料运输阶段的碳排放涉及的阶段是从原料混凝土生产厂家运输原料到混凝土生产厂家,主要计算运输工具所消耗能源而产生的碳排放,涉及计算参数是原材料的质量、运输工具的油耗量、运输距离和燃料的碳排放系数。混凝土运输过程中的 CO₂ 排放量可以根据《建筑碳排放计量

标准》来进行计算,其计算公式如式(3)。

$$CO_{2-t} = \sum \frac{G_i}{ZC_i} \cdot L_i \cdot Q_{si} \cdot EF_f \quad (3)$$

式(3)中,G_i为第i种材料的使用数量(t),ZC_i为运输第i种材料的运输工具平均载重量(t),Q_{si}为运输第i种材料的运输工具单位耗油量(t/km),L_i为原材料i从工厂到混凝土生产的运输距离(km),EF_f为燃料的排放因子(kgCO₂/GJ)。

2.2.3 混凝土生产阶段

混凝土生产阶段的碳排放是生产设备所消耗电量所产的碳排放,涉及到的计算参数是生产设备的功率、使用生产设备的时间和电的碳排放系数。通过分析分类设施的容量与日用电量的比值,得到与每个设施相关的工作量,即混凝土生产期间的 CO₂ 排放可根据使用过的设备电耗进行计算,根据《建筑碳排放计量标准》^[16],如式(4)所示。

$$CO_{2-t} = \sum_{i=1}^n P_{di} \cdot T_{di} \cdot N_i \cdot EF_l \quad (4)$$

式(4)中,P_{di}为第i种生产设备的电功率(kW),T_{di}为第i种生产设备的运行小时数(h),N_i为第i种生产设备的数量(台),EF_l为电碳排放因子[kgCO₂/kW·h]。

混凝土生命周期所涉及的主要原材料和能耗建立碳排放因子如表1所示。其中水泥以贵州麻江水泥厂的生产1t普通硅酸盐水泥(42.5MPa)来计算本文水泥的碳排放清单,首先建立水泥生产过程,主要包括石灰石开采、生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨4个单元过程,石灰石、黏土、石膏等假设18t柴油货车平均公路运输50km,对应生产过程的投入见表2,排出物质只考虑CO₂。所以水泥生产过程中的碳排放量是830.30 kgCO₂/t。

结合磷矿渣的生产工艺和能耗清单,本文通过eFootprint软件计算了贵州某黄磷有限公司生产1t磷矿渣的碳排放清单,其生产过程中的碳排放量是109.27 kgCO₂/t。

表1 混凝土主要碳排放因子数据

序号	材料名称	碳排放系数/(kgCO ₂ /t)
1	水泥	830.15
2	碎石	3.12
3	砂	3.66
4	水	0.194
5	减水剂	28.49
6	粉煤灰	84.4
7	磷矿渣	109.27
8	柴油	74.1
9	南方区域电网	0.714

表 2 水泥生产过程投入清单数据

过程名称	材料名称	数量	上游过程数据
生料制备	石灰石	843.31 kg	CLCD;石灰石开采
	黏土	120.61 kg	CLCD;黏土开采
	铁粉	36.12 kg	CLCD;铁原矿市场平均
	电力	21 kW·h	CLCD;全国平均电网电力混合
熟料煅烧	生料	1.52 t	直接填写数据
	煤粉	150 kg	CLCD;硬煤(烟煤、无烟煤)运输后
	电力	28.75 kW·h	CLCD;全国平均电网电力混合
水泥磨粉	熟料	0.75t	直接填写数据
	石膏	50 kg	CLCD;石膏矿开采
	混合材	200 kg	忽略
	电力	41.8 kW·h	CLCD;全国平均电网电力混合

3 生命周期评价的不确定性分析

数据的有效性和准确性对生命周期结果可靠性的分析和评价起着关键作用,可靠的 LCA 的结果才能在实践中被接受和使用^[17,18]。LCA 是一种包含大量数据的分析方法,存在着许多的假设和各种的不确定性,清单分析是进行 LCA 分析的基础,该阶段需要大量数据可能来自文献或现有数据库,存在着大量的不确定性,因此对评价结果进行不确定性分析是非常有必要的。本文引入数据质量评价方法(data quality index,DQI)对混凝土碳排放量化的数据质量进行定性、定量分析,在此基础上再采用蒙特卡罗法对 LCA 参数不确定性进行分析^[19]。

3.1 确定数据质量指标值

数据可靠度可以被定性反映为数据质量的评价结果,但若需对计算结果的不确定性进行量化,该评价结果不能直接被采用。因此,可以通过四参数(Beta 函数)以位置参数(a 、 b)和形状参数(α 、 β)表针概率分布特征,如式(5)和(6)所示。

$(\alpha,\beta)=\max[\text{int}(2S_{DOI}-5,1)]\cdot(1,1)$ (5)

$(a,b)=\mu\cdot[0.4+0.05\text{int}(2S_{DOI}),1.6-0.05\text{int}(2S_{DOI})]$ (6)

式(5)、(6)中 S_{DQI} 为数据质量综合评分; μ 为数据的代表值,如平均值、似然值等。

数据质量综合评分方法采用平均值评分法,按式(7)计算:

$S_{DOI,avg}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^iS_{DOI,i}$ (7)

向量元素期望值 q 的计算:

$q=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^iq_i$ (8)

式(8)中, q 为向量元素期望值; n 为向量元素

个数; q_i 为向量元素值。

计算向量元素期望值 q 在质量指标范围中的占比 R :

$R=\frac{q-\min q_i}{\max q_i-\min q_i}$ (9)

式(9)中, $\min q_i$ 为最小向量元素值; $\max q_i$ 为最大向量元素值。因为 $\min q_i>0$,为了计算在质量范围所占的真实百分数,分子分母需减掉 $\min q_i$ 。又由于 $1\leq q_i\leq 5$,所以质量范围为 4。由式(7)和(8)得:

$R=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nq_i-1}{4}\times 100$ (10)

根据每个占比值 R 将 DQI 分配给每个输入数据,与输入数据元素相关的总体不确定性就可以通过分析单一指标值 DQI 而得出。具体 DQI 分配如表 3 所示。

表 3 DQI 分配矩阵

最大可达质量值所占百分数/%	DQI
$0\leq R<12.5$	1.0
$12.5\leq R<25$	1.5
$25\leq R<37.5$	2.0
$37.5\leq R<50$	2.5
$50\leq R<62.5$	3.0
$62.5\leq R<75$	3.5
$75\leq R<87.5$	4.0
$87.5\leq R<100$	4.5
$R=100\%$	5.0

3.2 随机分布的建立

在确定了清单模型输入数据的 DQI 后,根据一个代表性的概率分布可使每一个数据转换为随机变量。 β 分布依据不同的端点范围和形状参数能够对任何形状的分布进行近似模拟,如正态分布、对数正态分布、均匀分布和指数分布等^[20,21],这是因为 β 分布概率密度函数公式包括 2 个形状参数 α 和 β 及端点参数 a 和 b 。概率出现的位置由选定的

形状参数决定,而端点位置限定了参数的取值范围。故 β 分布最适合用于相关参数和实际概率分布未知的情况。对应于每个 DQI 的端点范围和 β 分布形状参数如表 4 所示。

表 4 综数据质量指标概率分布

最大可达质量 值所占百分数	DQI	形状参数		变化范围/%	
		α	β	a	b
$0 \leq R < 12.5$	1.0	1	1	-50	+50
$12.5 \leq R < 25$	1.5	1	1	-45	+45
$25 \leq R < 37.5$	2.0	1	1	-40	+40
$37.5 \leq R < 50$	2.5	2	2	-35	+35
$50 \leq R < 62.5$	3.0	2	2	-30	+30
$62.5 \leq R < 75$	3.5	2	2	-25	+25
$75 \leq R < 87.5$	4.0	3	3	-20	+20
$87.5 \leq R < 100$	4.5	4	4	-15	+15
$R = 100$	5.0	5	5	-10	+10

4 结果与分析

4.1 碳排放分析

混凝土的碳排放包括原材料生产阶段、原材料运输段和混凝土生产阶段。本文以混凝土厂的 3 种强度混凝土来计算其的碳排放,强度为 C70 混凝土的生命周期碳排放为 399.85 kg/m³,强度为 C40 的碳排放为 297.02 kg/m³,强度为 C30 的碳排放

为 239.85 kg/m³,详见表 5。混凝土的碳排放随着强度的增加而增加,因为为了保持和易性和夯实度,水泥含量要求较高。

从计算的结果来看,混凝土原材料的运输和生产阶段对混凝土的二氧化碳总排放量贡献非常少的,碳排放最高的过程是原材料的生产阶段,主要来源于水泥的内含能,高达 85%,因此水泥的含量对混凝土碳排放的影响起决定性作用的。

表 5 混凝土的碳排放(1 m³)

kg

混凝土 强度	生命周期 碳排放	原材料名称							小计	合计
		水泥	碎石	砂	水	减水剂	粉煤灰	磷矿渣		
C70	配合比	350.00	1065.00	625.00	160.00	4.40	100.00	100.00		
	原材料生产阶段碳排放	290.55	3.32	2.29	0.03	0.13	8.44	10.93	315.69	399.85
	运输阶段碳排放	0.90	1.61	0.94	0	0.02	2.71	1.99	8.16	
	混凝土生产阶段碳排放	16.00	16.00							
C40	配合比	310.00	970.00	960.00	165.00	7.60	60.00	50.00		
	原材料生产阶段碳排放	257.35	3.03	3.51	0.03	0.22	5.06	5.46	274.66	297.02
	运输阶段碳排放	0.80	1.46	1.45	0	0.03	1.62	1.00	6.36	
	混凝土生产阶段碳排放	16.00	16.00							
C30	配合比	240.00	900.00	1000.0	165.00	6.00	60.00	60.00		
	原材料生产阶段碳排放	199.24	2.81	3.66	0.03	0.17	5.06	6.56	217.53	239.85
	运输阶段碳排放	0.62	1.36	1.51	0	0.03	1.62	1.19	6.33	
	混凝土生产阶段碳排放	16.00	16.00							

4.2 不确定性分析

在数据质量指标基础上,把数据质量分值转化为一定的输入数据概率分布,见表 6。每一个数据可以根据一个代表性概率转换为随机变量,通过蒙特卡罗法可以计算出参数不确定性的混凝土生命周期碳排放的输出。

蒙特卡罗法是指基于随机抽样的方法,在模型中输入清单数据的不确定性,最终获得不确定性量化的输出。本文利用的 Crystal Ball 软件进行 4000 次蒙特卡罗法仿真计算模拟,95%的置信区间。采

用蒙特卡罗法进行不确定性分析包括以下具体步骤:

(1)基于混凝土生命周期的划分,模拟的目标变量分别为原材料生产碳排放、运输阶段碳排放和混凝土生产阶段的碳排放。随机变量为原材料的碳排放系数、运输阶段的汽油碳排放系数和生产阶段的碳排放系数,详见表 6。

(2)假定参数,确定模拟次数和精度要求,输入表 7 不同输入参数的概率分布,运算模拟程序,输出不确定性量化的结果,最后对结果进行分析。

表 6 混凝土生命周期碳排放(1 m³)

kg

不同强度混凝土	取值分类	混凝土生命周期碳排放量			合计
		原材料生产阶段	运输阶段	混凝土生产阶段	
C70	最可能值	314.95	8.16	16.00	339.11
	最大值	402.43	8.67	19.12	430.22
	最小值	229.92	7.69	12.92	250.53
C40	最可能值	274.00	6.36	16.00	296.36
	最大值	354.67	6.74	19.12	380.53
	最小值	196.71	5.98	12.92	215.61
C30	最可能值	217.07	6.33	16.00	239.4
	最大值	277.59	6.68	19.12	303.39
	最小值	158.39	5.93	12.92	177.24

1 m³ 混凝土生命周期碳排放总量等于原材料生产环节、运输环节和混凝土生产所产生的二氧化碳气体总和,C70、C40 和 C30 强度混凝土生命周期

的碳排放的均值分别为 340.20、297.33 和 240.09 kg,模拟的具体结果分别如图 2、3 和 4 所示。

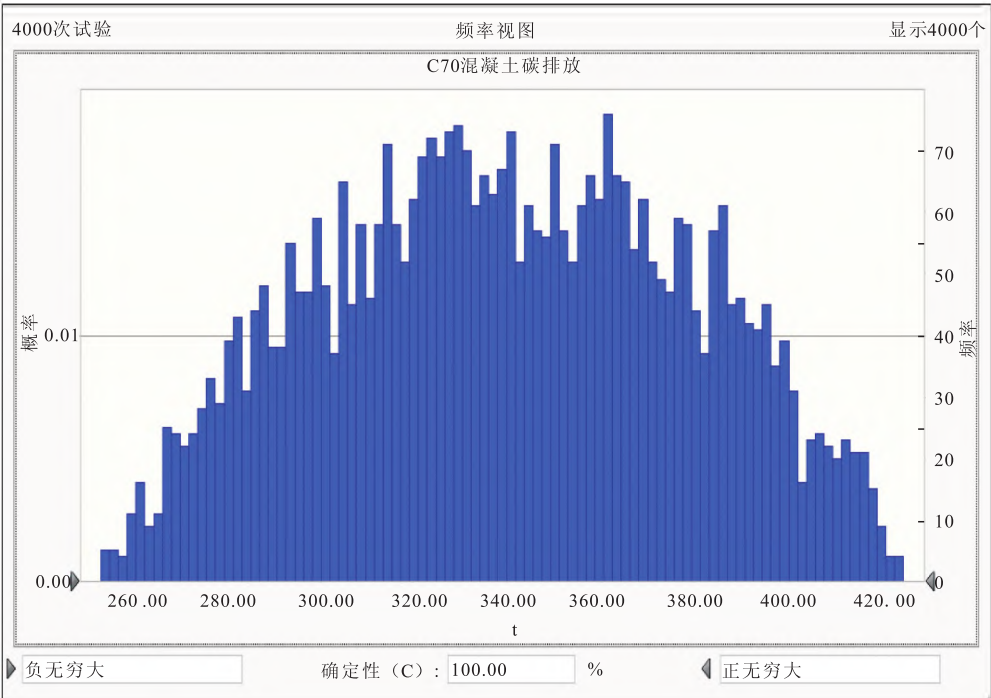


图 2 C70 混凝土生命周期碳排放模拟

由于以上的结果为一次模拟的结果,为了进一步验证以上结果的正确性,本文利用 Bootstrap 方法,对混凝土各环节的不确定性进行了分析。具体步骤如下:①针对每一种强度混凝土,分别选择原材料生产阶段碳排放、运输阶段碳排放、混凝土生产阶段碳排放和生命周期碳排放总量作为目标值;②针对这些目标值进行 4000 次模拟,100%的置信区间。每次随机抽取 4000 个样本,获得平均值,如此重复 4000 次,得到 4000 个平均值作为模型输入的代表,是对模型输入的不确定性分布的具体描述。不确定性上限为(97.5 分位数-平均值)/平

均值×100%,下限为(2.5 分位数-平均值)/平均值×100%,模拟结果见表 7。对混凝土组成的原材料数据进行 Kolmogorov Smirnov 检验(KS test),验证了所有原材料数据都是正常的。

由表 7 可知,3 种强度混凝土的原材料生产阶段碳排放的不确定性偏大,其不确定性范围在(-22%,22%),主要原因是原材料清单数据的获取不确定性较大,运输阶段的不确定性绝对值为 3.5%左右,说明收集的数据比较可靠,混凝土生产阶段的碳排放的不确定性较好,其绝对值是 14%左右,主要原因是电碳排放因子和设备耗时的统计不确定性,

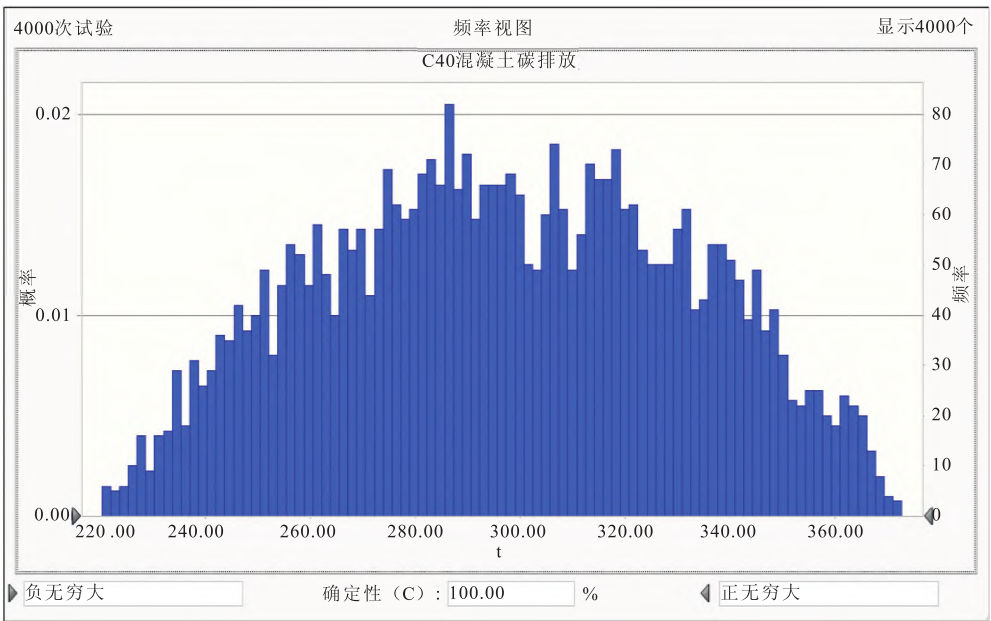


图 3 C40 混凝土生命周期碳排放模拟

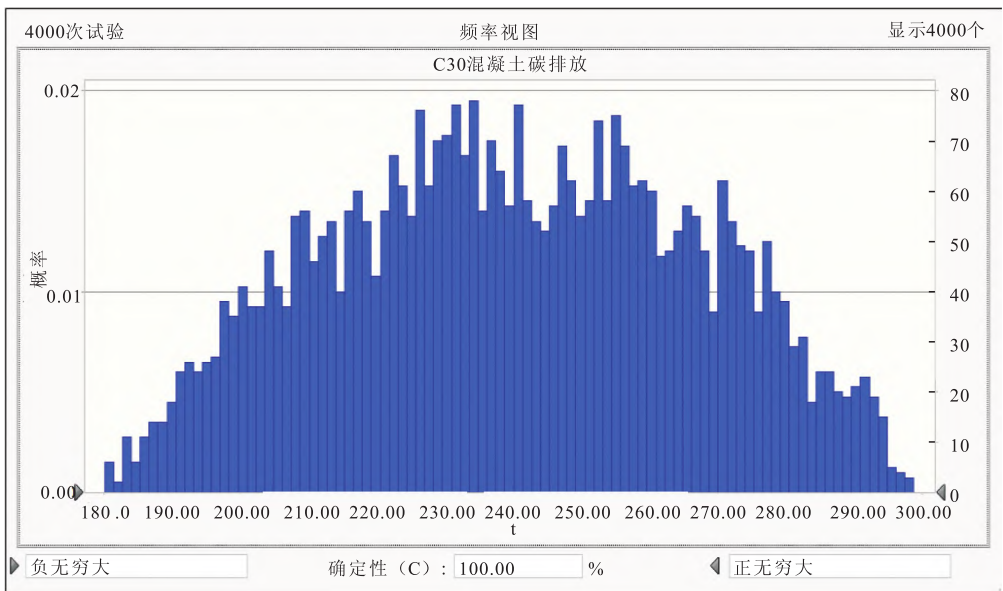


图 4 C30 混凝土生命周期碳排放模拟

表 7 1 m³ 混凝土的碳排放表不确定分析

强度	碳排放/kg	均值/kg	2.5%分位数/kg	97.5%分位数/kg	不确定性/%
C70	原材料生产阶段	315.64	244.55	386.60	(-22.52,22.48)
	运输阶段	8.17	7.88	8.46	(-3.55,3.55)
	混凝土生产阶段	16.02	13.72	18.31	(-14.36,14.29)
	总排放	339.83	268.95	410.62	(-20.86,20.83)
C40	原材料生产阶段	274.62	211.91	336.96	(-22.84,22.70)
	运输阶段	6.36	6.15	6.58	(-3.30,3.45)
	混凝土生产阶段	16.02	13.72	18.31	(-14.36,14.29)
	总排放	297.03	234.34	359.52	(-21.11,21.04)
C30	原材料生产阶段	217.42	168.90	256.99	(-22.32,18.20)
	运输阶段	6.33	6.11	6.54	(-3.48,3.32)
	混凝土生产阶段	16.02	13.72	18.31	(-14.36,14.29)
	总排放	239.67	191.09	288.12	(-20.27,20.22)

最后导致混凝土生命周期的碳排放清单不确定性较合适,不确定性为 $(-20.86\%, 20.83\%)$ 。3种强度混凝土的碳排放的确定性几乎一致,说明影响因素是一致的,如混凝土原材料的碳排放因子。由于数据的缺失或者收集数据的手段不够先进,目前无法保证收集数据足够准确和齐全,这将是以后继续改进和研究的方向。

5 结论

本文以含有磷矿渣和粉煤灰的混凝土作为研究对象,基于 LCA 构建混凝土生命周期碳排放评价模型,采用蒙特卡罗法对混凝土生命周期碳排放进行不确定性分析,得到如下结论:

(1)强度为 C70 混凝土的生命周期碳排放为 399.85 kg/m^3 ,强度为 C40 的碳排放为 297.02 kg/m^3 ,强度为 C30 的碳排放为 239.85 kg/m^3 ,混凝土的碳排放随着强度的增加而增加,由于水泥含量增加。混凝土生命周期的碳排放在不同阶段有着不同的特点,碳排放最高的过程是原材料的生产阶段,即原材料内含能,主要来源于水泥的内含能,高达 85% ,因此水泥的含量对混凝土碳排放的影响起决定性作用。

(2)3种强度混凝土的原材料生产阶段碳排放的不确定性偏大,其不确定性范围在 $(-22\%, 22\%)$,主要原因是原材料清单数据的获取不确定性较大,运输阶段的不确定性绝对值为 3.5% 左右,说明收集的数据比较可靠,混凝土生产阶段的碳排放的不确定性较好,其绝对值是 14% 左右,主要原因是电碳排放因子和设备耗时的统计的不确定性,总体来说,混凝土生命周期的碳排放清单不确定性较合适,不确定性为 $(-20.86\%, 20.83\%)$ 。3种强度混凝土的碳排放的不确定性几乎一致,均来自混凝土原材料的碳排放因子。

参考文献:

- [1] Vanden H P, Gruyaert E, Robeyst N, et al. Life cycle assessment of a column supported isostatic beam in high-volume fly ash concrete[M]. RILEM Publications, 2010: 437-444.
- [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] Kim T, Tae S, Roh S. Assessment of the CO_2 emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25: 729-741.

- [4] Tait M W, Cheung W M. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(6): 847-860.
- [5] Chen Z, Qiu H, Gao L, et al. A local adaptive sampling method for reliability-based design optimization using Kriging model[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2014, 49(3): 401-416.
- [6] 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.
- [7] Kim T, Tae S, Roh S. Assessment of the CO_2 emission and cost reduction performance of a low-carbon-emission concrete mix design using an optimal mix design system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25: 729-741.
- [8] 莫华, 张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. 环境科学研究, 2003, 16(5): 55-58.
- [9] Zhang Y, Wu W, Wang Y. Bridge life cycle assessment with data uncertainty[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(4): 569-576.
- [10] Wu P, Xia B, Zhao X. The importance of use and end-of-life phases to the lifecycle green house gas (GHG) emissions of concrete - A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 37: 360-369.
- [11] Zhang Y, Zhang J, Lü M, et al. Considering uncertainty in life-cycle carbon dioxide emissions of fly ash concrete[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 2015: 1-9.
- [12] Remondo D, Srinivasan R, Nicola V F. Adaptive importance sampling for performance evaluation and parameter optimization of communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(4): 557-565.
- [13] Li T M, Wu Y T, Chuang Y Y. SURE-based optimization for adaptive sampling and reconstruction[J]. Acm Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 1-9.
- [14] 方卓祯, 徐照. 基于 RFID 的预制混凝土构件物化阶段碳排放跟踪计算[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(2): 8-15.
- [15] Vytla V, Huang P, Penmetsa R. Multi-objective aerodynamic shape optimization of high speed train nose using adaptive surrogate model[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 25.
- [16] 贾铨修. 基于生命周期评价的 3D 打印建筑结构碳排放量化分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [17] 仓玉洁. 建筑物化阶段碳排放核算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- [18] 樊俊江, 於林峰. 再生混凝土的碳排放计算与分析[J]. 粉煤灰, 2016, 28(4): 32-34.
- [19] Zhang J, Xu L, Gao R. Multi-island genetic algorithm optimization of suspension system[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2012, 10(7): 1685-1691.
- [20] 高铁男. 基于组合代理模型的汽车碰撞安全性多目标优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [21] 张贤超. 超高性能透水混凝土配合比设计及其生命周期环境影响评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.