

再生混凝土全生命周期碳化的 CO₂ 排放评价

雷 斌, 杨婉莹, 余林杰, 晏育松 *

(南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 为了减少再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量, 考虑再生混凝土服役阶段的碳化作用, 采用碳化再生粗骨料、CO₂ 环境下搅拌和养护的固碳方式对再生混凝土全生命周期进行碳化设计。运用生命周期评价(LCA)理论, 将再生混凝土生命周期分为 6 个阶段, 分别为原材料生产和运输、再生混凝土的生产、运输、施工、服役、拆除, 并建立了各阶段 CO₂ 排放计算模型, 探究了 1 m³ 的 C30 再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量。此外, 对再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放的环境影响进行了评价。结果表明: 与仅服役阶段碳化作用下的再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量(A_{PL})相比, 再生混凝土全生命周期碳化作用下的 CO₂ 排放量(B_{PL})减少; 与再生粗骨料固碳相比, 再生混凝土搅拌和养护固碳对降低再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放的作用更好; 用再生粗骨料取代部分天然粗骨料可以节约环境成本, 减少 CO₂ 排放量, 具有显著的环境价值和经济价值。

关键词: 再生混凝土; 再生粗骨料; CO₂ 排放; 固碳方式; 生命周期评价; 环境价值

中图分类号: TU528.01 文献标识码: A doi:10.19761/j.1000-4637.2023.11.082.06

CO₂ emission evaluation of full life cycle carbonization of recycled concrete

LEI Bin, YANG Wanying, YU Linjie, YAN Yusong*

(School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to reduce the full life cycle CO₂ emission of recycled concrete, the carbonization effect during the service stage of recycled concrete was considered, and the carbonization design of the full life cycle of recycled concrete was carried out by using carbonized recycled coarse aggregates, mixing and curing in CO₂ environment. Using the theory of life cycle assessment (LCA), the life cycle of recycled concrete was divided into six stages, namely raw material production and transportation, production, transportation, construction, service and demolition of recycled concrete. The CO₂ emission calculation models for each stage were established, and the CO₂ emission during the full life cycle of 1 m³ of C30 recycled concrete were explored. In addition, the environmental impact of CO₂ emission during the full life cycle of recycled concrete was evaluated. The results show that compared with the full life cycle CO₂ emission (A_{PL}) of recycled concrete under carbonization during the service stage only, the CO₂ emissions (B_{PL}) of recycled concrete under full life cycle carbonization are reduced. Compared with the carbon sequestration of recycled coarse aggregates, the mixing and curing of recycled concrete have a better effect on reducing CO₂ emission during the full life cycle of recycled concrete. Replacing some natural coarse aggregates with recycled coarse aggregates can save environmental costs, reduce CO₂ emission, which has significant environmental and economic value.

Keywords: Recycled concrete; Recycled coarse aggregate; CO₂ emission; Carbon sequestration method; Life cycle assessment(LCA); Environmental value

0 引言

将再生骨料固碳作用、再生混凝土搅拌和养护固碳作用纳入再生混凝土生命周期 CO₂ 排放评价

中,可以减少 CO₂ 排放量,对于实现“双碳”目标具有重要意义。近年来,国内外出现了较多运用生命周期评价(以下简称 LCA)理论分析再生混凝土生命周期 CO₂ 排放的研究。高唱^[1]研究表明,在再生粗骨料取代率为 30% 的 C30 再生混凝土生命周期 CO₂ 排放量中,水泥生产阶段占比为 88.44%,原材料运输阶段占比为 10.15%,即水泥生产和原材料运

基金项目:国家自然科学基金项目(51968046);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划——领军人才项目(20204BCJ22003)。

输阶段基本决定了再生混凝土的 CO₂ 总排放量。肖宇等^[2]研究表明,水泥用量和再生粗骨料的运输距离是影响再生混凝土 CO₂ 排放的重要参数。徐金俊等^[3]研究表明,建筑服役阶段和原材料生产阶段是建筑生命周期 CO₂ 排放量最大的两个阶段。孙永乐^[4]研究发现,水泥产生化学反应是非能源 CO₂ 排放的最大来源之一,每生产 1 t 水泥释放约 0.511 t 的 CO₂。可见,原材料生产和运输是影响再生混凝土 CO₂ 排放的主要因素。此外,ZHANG 等^[5]指出,目前考虑碳化对计算混凝土生命周期内 CO₂ 排放量作用的研究较少,忽略了 CO₂ 排放和 CO₂ 吸收之间的平衡。PADE 等^[6]研究表明,混凝土服役阶段的碳化作用可以显著减少混凝土生命周期 CO₂ 排放量。

由于全球水泥和混凝土产量巨大,如果不考虑混凝土对 CO₂ 的吸收作用,将会高估水泥和混凝土行业产生的 CO₂ 排放量,并对 CO₂ 排放相关政策、环境标准以及基于环境效应的材料选择产生一定影响^[7]。文献[8]指出,在混凝土结构拆除、破碎并回收利用的过程中,再生骨料的 CO₂ 捕获效果显著,其吸收了水泥生产过程中排放的高达 41% 的 CO₂,若忽略此碳化作用,CO₂ 排放量可能会高估 13%~48%。因此,有必要将混凝土在服役阶段吸收的 CO₂ 纳入生命周期 CO₂ 排放量计算中,但目前关于该方面的研究相对较少^[9]。

综上,本文不仅考虑再生混凝土服役阶段的碳化作用,还将再生粗骨料固碳作用、再生混凝土搅拌和养护固碳作用计入再生混凝土生命周期 CO₂ 排放中,即再生混凝土全生命周期碳化。在此基础上,基于 LCA 理论,采用碳排放系数法和生产现场实测法,以原材料生产阶段为起点,再生混凝土拆除阶段为终点,建立再生混凝土各阶段 CO₂ 排放计算模型,并进行环境影响评价,以期降低再生混凝土全生命周期的 CO₂ 排放。

1 基于 LCA 的再生混凝土计算系统的确定

1.1 研究目标与计算边界

研究目标:综合考虑再生混凝土全生命周期碳化作用对其 CO₂ 排放量的影响,并给出环境影响评价与分析。功能单位为 1 m³ 的 C30 再生混凝土,具体计算再生粗骨料取代率分别为 0、30%、50%、70%、100% 的再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量。其中,功能单位是 LCA 系统输出功能的量度指标^[10],选择合适的功能单位有助于在清单分析时将收集的数据进行换算,并将系统内的输入和输出进行标准化,从而保证 LCA 结果的可比性。

计算边界:本文再生混凝土生命周期包括 6 个

阶段,分别为原材料生产和运输、再生混凝土的生产、运输、施工、服役、拆除。采用从“摇篮”到“坟墓”的系统边界^[11-12],图 1 为以原材料生产为起点、再生混凝土拆除为终点的再生混凝土生命周期计算边界。

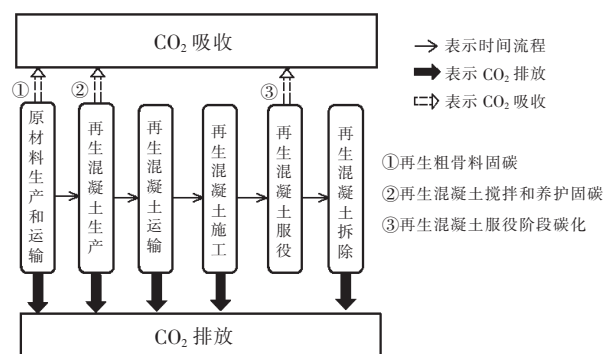


图 1 再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量计算边界

Figure 1 Calculation boundary of CO₂ emissions during the full life cycle of recycled concrete

1.2 各阶段 CO₂ 排放计算模型

根据再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量计算边界定义,确定再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量计算公式,见式(1)。

$$P_L = P_{1a} + P_{1b} + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (1)$$

式中: P_L 为再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量; P_{1a} 为原材料生产阶段 CO₂ 排放量; P_{1b} 为原材料运输阶段 CO₂ 排放量; P_2 为再生混凝土生产阶段 CO₂ 排放量; P_3 为预拌再生混凝土运输阶段 CO₂ 排放量; P_4 为再生混凝土施工阶段 CO₂ 排放量; P_5 为再生混凝土碳化阶段 CO₂ 吸收量; P_6 为再生混凝土拆除阶段 CO₂ 排放量。

P_{1a} 、 P_{1b} 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 的计算公式分别如式(2)~式(8)所示。

$$P_{1a} = \sum M_i C_i \quad (2)$$

式中: M_i 为第 i 种原材料的用量; C_i 表示第 i 种原材料的碳排放系数。

$$P_{1b} = \sum M_i L_i^j T_{C,i}^j \quad (3)$$

式中: L_i^j 为利用运输设备 j 将第 i 种原材料运输到搅拌站的距离; $T_{C,i}^j$ 为运输第 i 种原材料时,运输设备 j 的运输碳排放系数。

$$P_2 = \sum B_k K_k \quad (4)$$

式中: B_k 为 1 m³ 再生混凝土的第 k 类能源消耗量; K_k 为第 k 类能源的碳排放系数。依据文献[10],本文取 1 m³ 再生混凝土生产阶段的电能消耗为 2 kW·h,电能的碳排放系数为 1.195 kg/(kW·h)。

$$P_3=V_g LQK_y \tag{5}$$
式中: V_g 、 L 、 Q 、 K_y 分别为再生混凝土的体积、运输距离、单位油耗、柴油的碳排放系数。本文假设采用混凝土搅拌车运输,运输距离 L 为 30 km,根据常见的 6 m³ 混凝土搅拌车的油耗[0.60 L/(km·m³)]可知, Q 为 0.1 L/(km·m³),再由文献[13]可知, K_y 为 2.98 kg/L。

$$P_4=\frac{\sum B_k K_k}{n} \tag{6}$$
式中: n 为构件种类。本文再生混凝土施工阶段的 CO₂ 排放近似取为普通混凝土施工阶段的 CO₂ 排放,假设再生混凝土损耗率为 2%^[9],则由普通混凝土的主要构件能源消耗(见表 1)^[14],计算可得再生混凝土施工阶段的 CO₂ 排放。

$$P_5=0.044m_0x_cA_s \tag{7}$$
式中: m_0 为 1 m³ 再生混凝土完全碳化后吸收的 CO₂ 物质的量,参考文献[15]计算得到; x_c 为碳化深度; A_s 为 1 m³ 再生混凝土外露表面积。

$$P_6=0.9P_4 \tag{8}$$
式中: P_6 近似取为施工阶段能耗的 90%^[16]。

表 1 再生混凝土施工阶段主要构件的能源消耗^[14]
Table 1 Energy consumption of main components during the construction stage of recycled concrete

构件	电能/(kW·h·m ⁻³)	柴油/(L·m ⁻³)
梁	17.81	0.33
板	14.08	0.33
柱	18.09	0.33

1.3 考虑碳化作用的再生混凝土 CO₂ 吸收

1.3.1 再生粗骨料固碳

再生粗骨料固碳是指再生粗骨料表层附着旧砂浆中的主要水化产物 Ca(OH)₂、C-S-H 和未水化水泥熟料(主要矿物成分为 C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF)与 CO₂ 发生反应。再生粗骨料固碳属于 CO₂ 捕捉与封存技术中的矿物封存,在再生粗骨料生产阶段对其进行碳化处理,能够捕捉和吸收 CO₂,实现 CO₂ 排放的逆过程,从而降低其对环境的影响。

高越青等^[17]将水灰比为 0.45 的原生砂浆试块经颚式破碎机破碎得到再生粗骨料,再经 CO₂ 加速养护 14 d 得到碳化再生粗骨料,发现 100 mg 再生粗骨料可吸收 12.32 mg 的 CO₂,CO₂ 吸收率为 13.21%。基于此,考虑到再生粗骨料表层附着的旧砂浆含量在 25%~45%之间^[18-20],本文取原材料生产阶段的再生粗骨料表层附着旧砂浆含量为 35%,则当原生砂浆的水灰比为 0.45 时,100 mg 再生粗骨料

可吸收 12.32×35%=4.31 mg 的 CO₂。

1.3.2 再生混凝土搅拌和养护固碳

在再生混凝土生产阶段将其将置于 CO₂ 环境中进行搅拌和养护,不仅可以加速其硬化,还能吸收固化 CO₂^[21]。其中,搅拌固碳是将再生混凝土先在浓度为 99.9%的 CO₂ 气体环境中搅拌 240 s,然后在空气中搅拌 120 s。养护固碳是将再生混凝土先放入 CO₂ 气体浓度为 99.9%、压力为 0.1 MPa 的容器中养护 2 h,然后放入温度为 25 ℃、环境湿度≥95%的养护箱中养护至相应龄期。

根据文献[21],采用 P·O 42.5 级水泥制备水灰比为 0.15 的水泥浆体 70.00 g,测得其搅拌和养护阶段的固碳率为 10.8%,即固碳量为 7.56 g,将其作为基准固碳量。固碳量 M_{CO_2} 的计算公式见式(9)^[21]。

$$M_{CO_2}=M_1 C \tag{9}$$

式中: M_1 为基准固碳量,即 7.56 g; C 为水灰比系数,即水泥浆体与水泥的质量比。

综上,由文献[21]可知,当水灰比为 0.45 时,水泥浆体质量为 88.26 g,计算可得 C 为 1.45,固碳量为 10.96 g,则固碳率为 12.42%。

2 再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放计算案例

2.1 原材料生产和运输的 CO₂ 排放清单

为分析再生粗骨料取代率对再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量的影响,根据 JGJ/T 443—2018《再生混凝土结构技术标准》和文献[21],得到如表 2 所示的配合比,混凝土强度等级为 C30,水灰比为 0.45,再生粗骨料取代率分别为 0、30%、50%、70%、100%。其中:水泥为南昌海螺牌 P·O 42.5 级水泥;砂为河砂,细度模数为 2.55;天然粗骨料为碎石,粒径为 5~20 mm;再生粗骨料由废弃混凝土经破碎、筛分所得,粒径为 5~20 mm;水为自来水。

表 2 混凝土的配合比
Table 2 Mix proportions of concrete

					kg/m ³
编号	水泥	河砂	碎石	再生粗骨料	水
NAC	395	623	1 184	0	178
RAC-30	395	623	829	355	178
RAC-50	397	623	592	592	179
RAC-70	398	623	355	829	179
RAC-100	400	623	0	1 184	180

注:为保证有效水灰比和强度,在水灰比不变的前提下,适当调整水泥和水的用量。

再生混凝土生产过程中对 CO₂ 排放影响较大的阶段主要是原材料生产和运输。再生粗骨料生产阶段的 CO₂ 排放计算从废弃混凝土破碎、筛分开始,

到再生粗骨料制成结束。由于原材料所处位置的不同,其运输距离存在差异。对某一特定城市而言,天然骨料的运输距离基本是确定的,而再生骨料的运输距离可变。因此,为减少原材料运输阶段的 CO₂ 排放,再生骨料可就地取材,以减少运输距离。例如,将再生骨料加工厂设置在建筑废弃物附近,则再生骨料的运输距离近似为再生骨料加工厂到混凝土搅拌站的距离。高唱指出^[1],当再生骨料加工厂到混凝土搅拌站的距离在 16~18 km 以内时,再生骨料较天然砂石骨料的环境影响低,适宜按此距离设置再生骨料加工厂。因此,本文选取水泥、河砂、碎石、再生粗骨料的运输距离分别为 20、100、100、18 km,再进一步结合文献[13],得到了再生混凝土原材料生产和运输的 CO₂ 排放清单,如表 3 所示。

2.2 再生混凝土碳化阶段的 CO₂ 排放清单

表 3 再生混凝土原材料生产和运输的 CO₂ 排放清单^[1,13]

Table 3 CO₂ emission inventory for production and transportation of raw materials for recycled concrete

清单	水泥	河砂	碎石	再生粗骨料	水
碳排放系数 /(kg·t ⁻¹)	842.0	3.7	2.9	4.83	0.213
运距/km	20	100	100	18	0
运输碳排放系数 /[kg·(km·t) ⁻¹]	0.111	0.235	0.235	0.235	0

表 4 再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量

Table 4 CO₂ emissions during the full life cycle of recycled concrete

编号	P_{1a}	P_{1b}	P_2	P_3	P_4	A_{P5}	P_5	P_6	G_1	G_2	P_T	A_{PL}	B_{PL}
NAC	338.4	43.3	2.4	8.9	20.5	-5.3	-3.2	18.4	-71.1	0	431.9	426.6	357.6
RAC-30	339.1	36.5	2.4	8.9	20.5	-6.1	-3.2	18.4	-71.1	-15.3	425.8	419.7	336.2
RAC-50	341.2	31.9	2.4	8.9	20.5	-6.7	-3.2	18.4	-71.5	-25.5	423.4	416.7	323.1
RAC-70	342.5	27.4	2.4	8.9	20.5	-7.2	-3.2	18.4	-71.7	-35.7	420.1	412.9	309.5
RAC-100	344.9	20.5	2.4	8.9	20.5	-8.0	-3.2	18.4	-72.0	-51.0	415.6	407.6	289.3

注： P_T 为 CO₂ 排放总量， $P_T=P_{1a}+P_{1b}+P_2+P_3+P_4+P_6$ ； A_{P5} 为仅服役阶段碳化作用下的再生混凝土服役阶段的 CO₂ 吸收量； A_{PL} 为仅服役阶段碳化作用下的再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量， $A_{PL}=P_T+A_{P5}$ ； G_1 为再生混凝土搅拌和养护固碳量； G_2 为再生粗骨料固碳量； B_{PL} 为再生混凝土全生命周期碳化作用下的 CO₂ 排放量， $B_{PL}=P_T+P_5+G_1+G_2$ 。

由表 4 可知,与仅服役阶段碳化作用下的再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量(A_{PL})相比,再生混凝土全生命周期碳化作用下的 CO₂ 排放量(B_{PL})减少。当再生粗骨料取代率分别为 0、30%、50%、70%、100%时, B_{PL} 相比于 A_{PL} 分别减少了 69.0、83.5、93.6、103.4、118.3 kg。此外,与 NAC 组相比,RAC 组的 A_{PL} 和 B_{PL} 均较小,且再生粗骨料取代率越大, A_{PL} 和 B_{PL} 越小,说明在再生粗骨料的固碳作用下,再生混凝土

南昌市属于亚热带湿润季风气候,年平均相对湿度为 78.5%,CO₂ 环境浓度为 0.03%。本文假定再生混凝土养护 28 d,使用年限为 50 年,1 m³ 再生混凝土使用时的外露表面积 $A_s=5.68$ m²^[22]。另外,由于再生粗骨料在生产阶段已经进行了最大程度的固碳反应,其表观密度增加、孔隙率下降,故环境中的 CO₂ 在再生混凝土服役期间难以向再生粗骨料内部渗透,故本文假设再生粗骨料在再生混凝土服役期间无碳化,即再生粗骨料影响系数(g_{RC}) 取为 1,最后,在水灰比不变的前提下,根据肖建庄等^[23]提出的再生混凝土碳化深度模型计算出碳化深度 x_c ,进而计算出 P_5 。

由于再生混凝土生产阶段考虑了搅拌和养护固碳作用,故参与再生混凝土服役阶段的可碳化水泥和水的质量减少^[24],但水灰比保持不变。因此,根据再生混凝土搅拌和养护固碳量(G_1),按碳化反应方程式推算出 Ca(OH)₂ 量[假设 CaCO₃ 均由 Ca(OH)₂ 与 CO₂ 反应生成],再按水泥水化反应方程式推算出水泥熟料(C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF)量,接着根据水泥熟料在水泥中的占比推算出水泥量,则剩余的水泥量即为再生混凝土服役期间可碳化的水泥量。

2.3 计算结果与分析

根据表 2 和表 3 数据,按式(2)~式(8)分别计算得到仅服役阶段碳化作用和全生命周期碳化作用下,不同再生粗骨料取代率的再生混凝土全生命周期 CO₂ 排放量,如表 4 所示。

全生命周期 CO₂ 排放减少,其中, B_{PL} 的减少主要与原材料运输阶段的 CO₂ 排放量(P_{1b})减少和再生粗骨料固碳量(G_2)的增加有关, B_{PL} 与再生粗骨料取代率的拟合公式见式(10),拟合系数 $R^2=0.998$,说明 B_{PL} 于 r 之间具有良好的线性关系。

$$B_{PL}=ar+b$$

(10)

式中: a 为拟合系数,本文 $a=-0.676$; r 为再生粗骨料取代率; b 为普通混凝土的全生命周期 CO₂ 排放量,

本文 $b=357.6\text{ kg/m}^3$ 。

不同再生粗骨料取代率的再生混凝土在生产、运输、施工、拆除阶段的 CO_2 排放量(P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_6)均分别为 2.4、8.9、20.5、18.4 kg,这是因为再生粗骨料取代率的不同只与再生粗骨料的生产和运输以及再生混凝土服役阶段的 CO_2 排放有关,不影响再生混凝土在生产、运输、施工、拆除阶段的 CO_2 排放, P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_6 主要与再生混凝土的运输距离、运输方式、生产技术等因素有关。

对比原材料生产和运输阶段的 CO_2 排放量(P_{1a} 、 P_{1b})以及再生混凝土的 CO_2 排放总量(P_T)可知, P_{1a} 随着再生粗骨料取代率的增加而增大,但增幅不大,这是因为再生粗骨料的碳排放系数大于天然粗骨料,故当再生粗骨料取代率增加时, P_{1a} 随之增大,但由于原材料生产阶段的 CO_2 排放主要来源于水泥生产,而本试验中水泥用量变化很小,即水泥生产产生的 CO_2 排放量变化很小,故 P_{1a} 随着再生粗骨料取代率的增加变化不大。 P_{1b} 和 P_T 均随着再生粗骨料取代率的增加而减小,这主要是因为再生粗骨料的运输距离较短,节约了柴油能源消耗。此外,本试验 P_{1a} 占 P_T 的比例为 78%~83%, P_{1b} 占 P_T 的比例为 5%~10%。可见,原材料生产阶段的 CO_2 排放对再生混凝土的环境影响较大,原材料运输阶段的 CO_2 排放对再生混凝土的环境影响相对较小,但也不能忽视,否则容易造成最终结果出现较大误差。

再生混凝土搅拌和养护固碳量(G_1)占 B_{PL} 的比例为 20%~25%,说明再生混凝土搅拌和养护固碳对降低再生混凝土全生命周期碳化作用下的 CO_2 排放作用较大。再生粗骨料固碳量(G_2)随着再生粗骨料取代率的增加而增大, G_2 占 B_{PL} 的比例为 5%~18%,说明再生粗骨料固碳对降低再生混凝土全生命周期碳化作用下 CO_2 排放的作用不如再生混凝土搅拌和养护固碳。

2.4 环境影响评价结果分析

2.4.1 废弃混凝土的最终处理方式

废弃混凝土的最终处理方式主要有回收利用和直接填埋两种^[25-26]。其中,回收利用主要指将废弃混凝土制成再生骨料或再生微粉,并应用到混凝土生产中。直接填埋指将废弃混凝土直接运输至垃圾填埋场进行填埋,其 CO_2 排放仅考虑垃圾车运输和填埋处理机械的 CO_2 排放。LIU 等^[27]计算得到废弃混凝土直接填埋的 CO_2 排放量为 9.62 kg/t,环境成本为 223.16 元/t,而回收利用的环境成本为 9.24 元/t。可见,回收利用废弃混凝土不仅减少了因直接填埋产生的 CO_2 排放量 9.62 kg/t,还节约了环境成本

213.92 元/t,具有显著的环境价值和经济价值。

2.4.2 基于环境价值的 CO_2 排放分析

为直观反映再生混凝土全生命周期 CO_2 排放对环境造成的影响,将 CO_2 排放量转化为环境成本以及被完全吸收所需要的绿化面积或树木数量。由文献[28]可知,基于社会支付意愿 CO_2 的环境成本为 0.22 元/kg,1 m^2 绿化面积年吸收 CO_2 量为 4.29 kg,1 棵树木年吸收 CO_2 量为 18.3 kg,则可计算出 1 m^3 再生混凝土全生命周期 CO_2 排放的环境价值,结果见表 5。

表 5 1 m^3 再生混凝土全生命周期 CO_2 排放量转换结果

Table 5 Conversion results of CO_2 emissions during the full life cycle of 1 m^3 recycled concrete

编号	B_{PL} /kg	环境成本 /元	绿化面积 / m^2	树木 数量
NAC	357.6	78.7	83.4	19.5
RAC-30	336.2	74.0	78.4	18.4
RAC-50	323.1	71.1	75.3	17.7
RAC-70	309.5	68.1	72.2	16.9
RAC-100	289.3	63.6	67.4	15.8

由表 5 可知,再生混凝土 (RAC-30、RAC-50、RAC-70、RAC-100)的环境价值明显比普通混凝土 (NAC)的好。其中,RAC-100 再生混凝土 CO_2 排放的环境成本约为 63.6 元,所产生的 CO_2 相当于 67.4 m^2 绿化面积或 15.8 棵树木一年所吸收的量。与 NAC 组相比,RAC-100 组可节约环境成本 15.1 元,减少绿化面积 16.0 m^2 或树木 3.7 棵。可见,考虑再生粗骨料固碳作用、再生混凝土搅拌和养护固碳作用使得再生混凝土全生命周期 CO_2 排放量减少,具有显著的环境价值和经济价值。

3 结论

(1)建立了 1 m^3 再生混凝土全生命周期碳化作用下的 CO_2 排放模型。与仅服役阶段碳化作用下的再生混凝土全生命周期 CO_2 排放量(A_{PL})相比,再生混凝土全生命周期碳化作用下的 CO_2 排放量(B_{PL})减少,当再生粗骨料取代率分别为 0、30%、50%、70%、100%时, B_{PL} 相比于 A_{PL} 分别减少了 69.0、83.5、93.6、103.4、118.3 kg。

(2)再生混凝土搅拌和养护固碳量(G_1)占 B_{PL} 的比例为 20%~25%,再生粗骨料固碳量(G_2)占 B_{PL} 的比例为 5%~18%,说明再生粗骨料固碳对降低再生混凝土全生命周期碳化作用下 CO_2 排放的作用不如再生混凝土搅拌和养护固碳。

(3)与直接填埋相比,回收利用废弃混凝土具有显著的环境价值和经济价值。将再生粗骨料取代

100%天然粗骨料可以节约环境成本 15.1 元,减少的 CO₂ 排放量相当于 16.0 m² 绿化面积或 3.7 棵树木一年所吸收的 CO₂ 量。

参考文献:

- [1] 高唱.基于 LCA 的再生混凝土环境影响评价研究[D].北京:北京建筑大学,2020.
- [2] 肖宇,吴水根,肖建庄,等.绿色混凝土的碳排放分析[J].建筑施工,2019,41(2):312-317.
- [3] 徐金俊,乌忱昊,王浩,等.再生混凝土绿色建筑碳排放评价及灰色参数敏感性分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(3):396-403.
- [4] 孙永乐.建筑生命周期碳排放计算模型[J].山东英才学院学报,2018(2):60-64.
- [5] ZHANG Y R,LUO W,WANG J J,et al.A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete [J].Construction and Building Materials,2019,209:115-125.
- [6] PADE C,GUIMARAES M.The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective[J].Cement and Concrete Research,2007,37(9):1348-1356.
- [7] KIKUCHI T,KURODA Y.Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete [J].Journal of advanced concrete technology,2011,9(1):115-124.
- [8] COLLINS F.Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint [J].International Journal of Life Cycle Assessment,2010,15(6):549-556.
- [9] 肖建庄,黎骛,丁陶.再生混凝土生命周期 CO₂ 排放评价[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(5):1088-1092.
- [10] International Standards Organization.Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework: ISO/DIS 14040[S].Paris:European Committee for Standardisation, 2006.
- [11] MARINKOVIC S,RADONJANIN V,MALVSEV M,et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete [J].Waste Management,2010,30(11):2255-2264.
- [12] WU P,XIA B,ZHAO X B.The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete—A review [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,37:360-369.
- [13] 章玉容,徐雅琴,姚泽阳,等.配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J].浙江工业大学学报,2020,48(6):648-653.
- [14] 李小冬,王帅,孔祥勤,等.预拌混凝土生命周期环境影响评价[J].土木工程学报,2011,44(1):132-138.
- [15] 李春晖.复掺矿物掺合料混凝土碳化性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
- [16] GONG X Z,NIE Z R,WANG Z H,et al.Life cycle energy

consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing [J].Journal of Industrial Ecology,2012,16(4):576-587.

- [17] 高越青,潘碧豪,梁超锋,等.CO₂ 强化再生骨料的特性及其对再生混凝土性能的影响[J].土木与环境工程学报(中英文), 2021,43(6):95-102.
- [18] JUAN M S D,GUTIERREZ P A.Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate [J].Construction and Building Materials,2009,23(2):872-877.
- [19] HE Z,LI Z,Shao Y X.Effect of carbonation mixing on CO₂ uptake and strength gain in concrete [J].Journal of Materials in Civil Engineering,2017,29(10):04017176.
- [20] 唐薇.再生混凝土骨料固碳关键技术研究[D].深圳:深圳大学,2019.
- [21] ZHANG Y R,LIU M H,XIE H B,et al.Assessment of CO₂ emissions and cost in fly ash concrete [EB/OL].(2015-08-27)[2022-10-15].<https://www.researchgate.net/publication/280430859>.
- [22] LEE S H,PARK W J,LEE H S.Life cycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South-Korean apartment [J].Energy and Buildings,2013,58:93-102.
- [23] 肖建庄,雷斌.再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计[J].建筑科学与工程学报,2008,25(3):66-72.
- [24] PU Y H,LI L,WANG Q Y,et al.Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review [J].Construction and Building Materials,2021,282:122671.
- [25] 万惠文,水中和,林宗寿,等.再生混凝土的环境评价[J].武汉理工大学学报,2003(4):17-20,23.
- [26] 龚志起,丁锐,陈柏昆.废弃混凝土处理方式的环境影响比较[J].工程管理学报,2011,25(3):266-270.
- [27] LIU M H,ZHANG Y R,WANG Y F.Influence of environment conditions on carbon emission of fly ash concrete [J].Materials Research Innovations,2016,19:216-219.
- [28] 李小冬,吴星,张智慧.基于 LCA 理论的环境影响社会支付意愿研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005(11):1507-1510.

收稿日期:2022-11-07

第一作者:雷斌(1980—),男,博士,教授。

E-mail:blei@ncu.edu.cn

通信作者:晏育松(1980—),硕士,工程师。

通信地址:江西省南昌市红谷滩区学府大道 999 号南昌大学工程建设学院

E-mail:ysyan@ncu.edu.cn