

DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.05.032

再生混凝土生命周期 CO₂ 排放评价

肖建庄 黎 鹭 丁 陶

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)
(同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为评价再生混凝土 CO₂ 的排放量, 构建了再生混凝土 CO₂ 排放量化模型. 运用生命周期评价技术, 对原材料生产、运输、再生混凝土制备、施工建造、拆除废弃等阶段建立了 CO₂ 排放量的计算方法, 并计入碳化作用影响, 提出了再生混凝土碳化-吸收模型. 通过收集各阶段基础数据, 得到了 1 m³ 的 C30 再生混凝土 CO₂ 排放量. 最后, 将排放量转化为环境成本和等量吸收所需的绿化面积或树木棵数, 进行环境影响评价. 结果表明, 1 m³ C30 的再生混凝土生命周期 CO₂ 排放量随再生粗骨料取代率的提高而降低, 当取代率为 30%、50%、70%、100% 时, CO₂ 排放量分别为 314.2、310.9、307.6、301.4 kg; CO₂ 排放量随取代率提高而降低的主要原因为再生粗骨料运输和混凝土碳化作用; 对比普通混凝土, 再生混凝土在 CO₂ 减排上具有更优的环境价值.

关键词: 再生混凝土; CO₂ 排放量; 生命周期评价; 环境价值

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2016)05-1088-05

Life cycle assessment on CO₂ emission for recycled aggregate concrete

Xiao Jianzhuang Li Ao Ding Tao

(Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)
(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to assess CO₂ emission of recycled aggregate concrete (RAC), a quantitative model for CO₂ emission of RAC was proposed. By applying life cycle assessment (LCA) technology, the computational methods for CO₂ emission at the stages of raw material production, transport, preparation of RAC, construction and demolition to abandon were described. The influence of carbonation was considered and a model of carbonation-absorption for RAC was also proposed. By collecting the basic data at every stage, the CO₂ emission of 1 m³ C30 RAC was obtained. Finally, by converting CO₂ emission to environmental cost and the requirement of green areas or trees with same amount absorbed, the environmental impact assessment was conducted. The results show that the CO₂ emission of 1 m³ C30 RAC decreases with the increase of the replacement ratio of recycled coarse aggregate (RCA). The CO₂ emissions are 314.2, 310.9, 307.6, 301.4 kg when the replacement ratios are 30%, 50%, 70%, 100%, respectively. Transport of RCA and carbonation is the main reason for the reduction of CO₂ emission with the increase of the replacement ratio. Compared with natural concrete, RAC is superior to environmental values in the reduction of CO₂ emission.

Key words: recycled aggregate concrete; CO₂ emission; life cycle assessment; environmental value

中国是 CO₂ 排放量大国之一, 降低 CO₂ 排放量对我国具有重要意义. 近年来, 再生混凝土成为学术界和工程界研究的热点. 然而, 国内目前公开发表的文献仍较少涉及如何从 CO₂ 排放量(简称碳排放量)的角度去评价再生混凝土. 部分研究尝试利用生

命周期评价技术(LCA)对再生混凝土碳排放量进行核算, 但在分析时存在评价范围界定不全面、再生混凝土碳化作用考虑不深入、碳排放过程分析不完善等问题^[1-2]. 本文采用 LCA 技术, 从生命周期角度出发, 考虑再生混凝土碳化作用的影响, 建立再生混凝土

收稿日期: 2016-01-21. 作者简介: 肖建庄(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, jzx@tongji.edu.cn.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51325802).

引用本文: 肖建庄, 黎鹭, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.05.032.

士从起点到终点的碳排放量化模型,进一步完善再生混凝土碳排放量评价,以期对再生混凝土对环境的影响分析研究提供依据。

1 再生混凝土碳排放量化模型

1.1 计算边界和功能单位

以往再生混凝土生命周期计算边界的选取,通常仅限于使用前的生产过程。文献[3]在评价普通混凝土时指出,混凝土使用阶段和使用后阶段对生命周期评价具有重要影响。本文中,计算边界以再生混凝土原材料生产为起点,拆除废弃为终点,共由 6 个阶段组成(见图 1)。其中,在原材料生产阶段,仅考虑其生产环节,不再追溯原料入厂加工之前的上游过程,例如对于再生粗骨料,仅考虑废混凝土运进资源化厂后的加工过程。

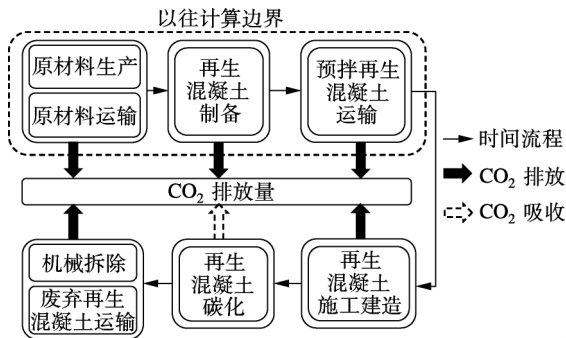


图 1 再生混凝土生命周期碳排放量计算边界

功能单位为产品输出功能的量度,是 LCA 中数据输入、输出的参照基准。为了保证具有不同再生粗骨料取代率的再生混凝土碳排放量的可比性,选取 1 m³ 具有相同强度与工作性的再生混凝土为功能单位。

1.2 碳排放阶段计算

从产生原因来看,再生混凝土碳排放量可分为直接和间接碳排放量。直接碳排放量主要为各阶段化石能源使用过程中释放的 CO₂ 以及水泥生产过程中材料自身产生的碳排放量(如石灰石的分解)。间接碳排放量是指能源获取过程(如电能生产、柴油加工等)中产生的 CO₂,应计入消耗该类能源的过程中。

1.2.1 原材料引入碳排放量

原材料引入碳排放量 C₁ 主要包括以下 2 部分:

1) 原材料生产碳排放量 C_{1a},即原材料生产、加工过程中所产生的 CO₂,主要包括能源消耗及材料加工时自身产生的碳排放量,其计算公式为

$$C_{1a} = \sum_i \left(\sum_j a_{ij} K_j \right) m_i + g_1 m_1 \quad (1)$$

式中 a_{ij} 为第 i 类原材料生产过程中第 j 类能源消耗量; m_i 为 1 m³ 再生混凝土中第 i 类原材料的用

量; K_j 为第 j 类能源碳排放量系数,取直接碳排放量系数 k_j 与间接碳排放量系数 k'_j 之和; g₁ 为水泥生产过程中材料自身产生的碳排放量。

2) 原材料运输至再生混凝土搅拌站产生的碳排放量 C_{1b},其计算公式为

$$C_{1b} = \sum_y (d^y + b_y^y k_j^y) s_i m_i \quad (2)$$

式中 d^y 为采用第 y 类运输方式的直接碳排放量系数; b_y^y 为第 y 类运输方式的单位运输能耗; k'_j 为第 j 类能源的间接碳排放量系数; s_i 为第 i 类原材料的运输距离。

1.2.2 再生混凝土制备碳排放量

再生混凝土生产过程碳排放量 C₂ 主要来自于能源消耗,其计算公式为

$$C_2 = \sum_j e_j K_j \quad (3)$$

式中 e_j 为 1 m³ 再生混凝土生产过程中第 j 类能源消耗量。

1.2.3 预拌再生混凝土运输碳排放量

再生混凝土运输至工地的过程将产生碳排放量,其计算公式为

$$C_3 = (d^y + b_y^y k_j^y) s_c M \quad (4)$$

式中 s_c 为再生混凝土运输距离; M 为 1 m³ 再生混凝土总质量,且 M = ∑_i m_i。

1.2.4 再生混凝土施工碳排放量

表 1 列举了部分主要建筑构件的能源消耗^[4],可认为再生混凝土与普通混凝土施工过程基本相同,取各主要构件碳排放量的平均值作为 1 m³ 再生混凝土施工碳排放量 C₄。按照式(3)计算各类构件的碳排放量,预拌再生混凝土损耗率取为 2%。

表 1 混凝土施工阶段主要构件能源消耗

1 m ³ 柱		1 m ³ 梁		1 m ³ 板	
电能/ (kW·h)	柴油/ L	电能/ (kW·h)	柴油/ L	电能/ (kW·h)	柴油/ L
18.09	0.33	17.81	0.33	14.08	0.33

1.2.5 再生混凝土拆除废弃碳排放量

再生混凝土仍处于推广阶段,可暂不考虑使用后的二次回收。再生混凝土拆除废弃碳排放量 C₆ 主要由拆除过程和废混凝土运输的碳排放量组成。拆除过程的能耗难以具体计算,文献[5]提出拆除能耗可按建造能耗的 90% 估算。据此可估算出拆除过程的碳排放量 C_{6a} = 0.9C₄。参考式(4)计算废弃再生混凝土运输产生的碳排放量 C_{6b}。

1.3 再生混凝土碳化-吸收模型

混凝土中的碱性物质与空气中的 CO₂ 发生化学反应,表现为吸收 CO₂ 现象,对环境产生一定的补偿效应。以往计算再生混凝土碳排放量时,往往忽略碳化作用或利用普通混凝土的吸收量来进行

估算,缺乏准确性.肖建庄等^[6]发现,与普通混凝土不同,再生混凝土的碳化深度随再生粗骨料取代率的不同而改变,并提出了再生混凝土碳化深度预测公式,即

$$x_c = 839g_{RC}(1-R)^{1.1} \sqrt{\frac{(W/(\gamma_c C) - 0.34)}{\gamma_{HD}\gamma_c C}} n_0 t \quad (5)$$

式中 x_c 为碳化深度; R 为相对湿度; W 为 1 m^3 再生混凝土水用量; C 为 1 m^3 再生混凝土水泥用量; γ_c 为水泥种类的修正系数,且对于波特兰水泥 $\gamma_c = 1$, 其他种类水泥取 $\gamma_c = 1 - \eta$, 其中 η 为掺和料质量分数; γ_{HD} 为水泥水化程度修正系数,且养护龄期超过 90 d 时取 $\gamma_{HD} = 1$, 养护龄期为 28 d 时取 $\gamma_{HD} = 0.85$, 中间养护龄期按线性插入取值; n_0 为 CO_2 的体积分数; t 为碳化时间; g_{RC} 为再生粗骨料影响系数,且再生粗骨料取代率为 0 时取 $g_{RC} = 1$, 取代率为 100% 时 $g_{RC} = 1.5$, 中间取代率时按线性插值取值.

碳化深度反映了混凝土的碳化程度,相同时间内碳化深度越大,碳化速率越快, CO_2 吸收量越高. 根据式(5)确定碳化深度范围的再生混凝土体积 V_c , 再由 V_c 与再生混凝土总体积 V_0 的比值来计算 CO_2 吸收量,计算公式为

$$C_s = 0.044m_0 \frac{V_c}{V_0} = 0.044m_0 \frac{x_c A_{\text{surface}}}{1} \quad (6)$$

式中, C_s 为再生混凝土碳化作用下的 CO_2 吸收量; m_0 为 1 m^3 再生混凝土完全碳化后吸收的 CO_2 物质的量,计算方法可参考文献[7]; x_c 为碳化深度; A_{surface} 为 1 m^3 再生混凝土外露表面积.

2 再生混凝土碳排放量算例

以上海地区为例,计算强度等级为 C30 的再生混凝土碳排放量,并与相同功能单位的普通混凝土进行对比分析.各混凝土配合比见表 2,假定采用柴油货车运输.

表 2 1 m^3 再生混凝土和普通混凝土的配合比

混凝土编号	m (水泥)	m (再生粗骨料)	m (天然粗骨料)	m (砂)	m (水)	m (粉煤灰)	m (矿粉)	m (减水剂)
RAC-30	235	309	721	793	178	53	71	5.20
RAC-50	240	515	515	793	178	53	71	5.27
RAC-70	245	721	309	793	178	53	71	5.35
RAC-100	251	1 030	0	793	178	53	71	5.44
NAC	231	0	1 030	793	178	53	71	5.15

注:配合比数据由上海市某再生混凝土搅拌站提供,采用水泥为 P. O 42.5R 型普通硅酸盐水泥; RAC-30, RAC-50, RAC-70, RAC-100 分别表示再生粗骨料取代率为 30%, 50%, 70%, 100% 的再生混凝土; NAC 表示普通混凝土.

2.1 基础数据

基础数据收集主要以查阅文献和调研相结合的方式,数据优先选用基于国家层次统计数据,无统计数据时,选取近几年公开发表文献的相关行业数据;部分过程缺乏文献数据,采用调研方式收集此过程中的相关数据.

表 3 列举了主要能源的碳排放量;表 4 为使用前的生产环节碳排放量计算参数,包含原材料引入碳排放、再生混凝土制备及运输.

表 3 主要能源的碳排放量

单位能源	直接碳排放量*	间接碳排放量	总碳排放量
1 kW · h 电能	0	1.195**	1.195
1 kg 煤	2.530	0.088***	2.618
1 L 柴油	2.730	0.448***	3.178

注:* 源于 IPCC 统计数据^[8]; ** 源于 CNMLCA 建立的中国材料生命周期清单库^[9]; *** 源于文献[10]数据换算得到.

再生粗骨料典型的生产工艺为:废混凝土入厂后,利用铲车将废混凝土放入破碎机,破碎后自动进入筛分机完成筛分,最终形成不同粒径的再生粗骨料.该类工艺生产效率高,但未设置除铁、除尘等设备,因此对废混凝土进料有较高要求,需完成废混凝土的初步分离.由于我国再生粗骨料仍处于推

表 4 再生混凝土使用前的生产环节碳排放量计算参数

单位材料	电能消耗/ (kW · h)	煤消耗/ kg	柴油消 耗/L	运输距离/ km*
1 t 水泥 ^[9]	40	96		200
1 t 再生粗骨料 ^[12]			0.507	20
1 t 天然粗骨料	1.17		0.723	300
1 t 砂	1.5		0.8	300
1 t 水	0.29			0
1 t 矿粉	76.93	21.66	0.12	30
1 t 减水剂	2.5	10		30
1 m^3 预拌 RAC	2.0			30

注:电能、煤、柴油消耗数据主要源于文献[11];粉煤灰作为一种工业废料,其碳排放量可忽略不计;* 运输距离通过对搅拌站调研得到;柴油货车运输的直接碳排放量系数为 89.841 g/(km · t),单位运输能耗为 37.63 g/(km · t)^[13].

广阶段,缺乏大规模生产的统计数据,因此表 4 借鉴了国外再生粗骨料加工的能耗数据.对比表 4 中文献[11]统计的天然骨料能耗,笔者认为文献[12]中的再生粗骨料能耗偏低,主要原因在于未计入废混凝土入厂前的初步分离过程;但考虑到本文计算边界为材料入厂后,且目前我国对建筑废物的初步分离包含大量人工过程,能源消耗较低,该数据仍具有一定的参考价值.

由于生产环节涉及数据较多,现对式(1)~

(4) 中各变量进行说明: 原材料种类 i 及其质量 m_i 参考表 2 取值; 能耗种类 j 、能耗量 a_{ij} 和 e_j 参考表 4 中各材料的电能、柴油、煤消耗量取值; 能源的碳排放系数 K_j 、 k_j 、 k'_j 参考表 3 取值; d^x 、 b_j^x 见表 4 中表注; s_i 、 s_c 参考表 4 中各材料的运输距离取值。

除生产环节外,在碳化阶段,考虑到上海地区环境相对湿度为 76%,CO₂ 环境浓度为 0.034%,

假定混凝土养护 28 d,使用年限为 50 a,1 m³ 再生混凝土使用时的外露表面积 $A_{\text{surface}} = 5.68 \text{ m}^2$ ^[14]; 在拆除废弃阶段,废混凝土运至填埋处堆放,取平均运输距离为 30 km。

2.2 计算结果及分析

根据基础数据,得到各混凝土生命周期碳排放量计算结果(见表 5)。

表 5 1 m³ 再生混凝土和普通混凝土生命周期碳排放量计算结果

混凝土编号	C ₁		C ₂	C ₃	C ₄	-C ₅	C ₆		C _T	C _L
	C _{1a}	C _{1b}					C _{6a}	C _{6b}		
RAC-30	207.5	56.2	2.4	7.8	21.8	-8.9	19.6	7.8	323.1	314.2
RAC-50	211.2	50.0	2.4	7.8	21.8	-9.6	19.6	7.8	320.5	310.9
RAC-70	214.8	43.7	2.4	7.8	21.8	-10.3	19.6	7.8	317.9	307.6
RAC-100	219.0	34.4	2.4	7.8	21.8	-11.3	19.6	7.8	312.8	301.4
NAC	204.9	65.6	2.4	7.8	21.8	-7.8	19.6	7.8	330.0	322.2

注: C_T 为碳排放总量, C_T = C₁ + C₂ + C₃ + C₄ + C₆; C_L 为生命周期碳排放量, C_L = C_T - C₅。

由表 5 可知,原材料生产阶段碳排放量 C_{1a} 占总排放量比例最大,为 62.1% ~ 70.0%; 原材料运输至再生混凝土搅拌站产生的碳排放量 C_{1b} 占 11.0% ~ 19.9%,其他非生产阶段产生的碳排放量占 17.3% ~ 18.2%。若按文献 [1-2] 中的核算方法,仅考虑生产阶段且不计原材料运输的影响,将低估碳排放总量 C_T 约 30%。此外,随着取代率的增加,1 m³ 再生混凝土水泥用量略有增加,而水泥生产过程中的碳排放量较大,按文献 [1-2] 的方法,计算结果显示再生混凝土碳排放量高于同强度的普通混凝土。但表 5 的结果表明,各取代率下再生混凝土生命周期碳排放量 C_L 均低于普通混凝土,且取代率越高碳排放量越低; 当取代率为 30%、50%、70%、100% 时,1 m³ C30 的再生混凝土生命周期碳排放量 C_L 分别为 314.2、310.9、307.6、301.4 kg,约为普通混凝土的 97.5%、96.5%、95.5%、93.6%。从各过程数据来看,再生混凝土碳排放量随取代率降低的原因主要为原材料运输 C_{1b} 和碳化吸收量 C₅ 的差异。

再生混凝土 CO₂ 吸收量高于普通混凝土,约为全过程碳排放量的 2.8% ~ 3.6%,且随着取代率的增加而逐渐增大。值得注意的是,碳化作用吸收量与表面积成正比,拆除后总表面积迅速增大,碳化吸收速度将迅速加快。此外,相比天然骨料,再生粗骨料含有水泥砂浆,在搅拌前表面暴露在空气中也会发生碳化; 骨料直径在 4 cm 以下时,吸收速度快,吸收量将主要取决于再生粗骨料的存放时间。再生混凝土拆除后以及再生粗骨料存放期间的 CO₂ 吸收量需进一步研究,但可以看出,碳化作用对再生混凝土碳排放量有影响,忽视吸收量将高估实际碳排放量。

与普通混凝土相比,原材料运输也是导致再生混凝土碳排放量较低的主要原因之一。随着再生粗

骨料取代率的增加,原材料运输碳排放量 C_{1b} 降低。其主要原因在于,再生骨料的原料为废混凝土,来源受地域限制小,加工厂选址可靠近搅拌站。但从生命周期碳排放量 C_L 来看,若再生粗骨料运输距离超过一定范围,再生混凝土碳排放量将超过普通混凝土。为保证再生混凝土的环境效益,当取代率为 30%、50%、70%、100% 时,对应的再生粗骨料运输距离应不大于 253.9、218.9、203.7、203.3 km。

2.3 影响评价与讨论

碳排放量数值不能直观地反映其产生的环境影响。将碳排放量转化为环境成本以及完全吸收所需的绿化面积或树木棵数,则有助于加深理解。将各类混凝土碳排放量计算结果进行转换,结果见表 6。由表可知,各类混凝土碳排放量基数较大,仅 1 m³ 混凝土产生碳排放量的环境成本约 69 元,需约 73 m² 绿化面积或 17 棵树木一年才能完全吸收。

表 6 1 m³ 再生混凝土和普通混凝土碳排放量转换

混凝土编号	C _L /kg	环境成本/元*	换算绿化面积/m ² **	换算植树/棵**
RAC-30	314.2	69.1	73.2	17.2
RAC-50	310.9	68.4	72.5	17.0
RAC-70	307.6	67.7	71.7	16.8
RAC-100	301.4	66.3	70.3	16.5
NAC	322.2	70.9	75.1	17.6

注: * 基于社会支付意愿 CO₂ 的环境成本为 0.22 元/kg^[15]; ** 据估计,1 m² 绿化面积年吸收 CO₂ 4.29 kg,1 棵树木年吸收 CO₂ 18.3 kg。

2013 年,上海地区混凝土产量为 5.829 × 10⁷ m³,若总产量的 10% 由再生粗骨料取代率为 100% 的再生混凝土替代,当年碳排放量将减少 1.2 × 10⁸ kg,环境成本减少 2 661.8 万元,相当于绿化面积 2 820 hm² 或 6.6 × 10⁶ 棵树的年吸收量。可见,在上海地区推广再生混凝土将产生可观的环境价值和生态效益。

3 结论

1) 针对以往再生混凝土碳排放量评价中的局限性,补充了运输、施工建造、混凝土碳化、拆除废弃等过程碳排放量的计算,建立了生命周期下的 1 m^3 再生混凝土碳排放量化模型。

2) 随着再生粗骨料取代率的提高, 1 m^3 C30 的再生混凝土生命周期碳排放量逐渐降低,当再生粗骨料取代率为 30%、50%、70%、100% 时,碳排放量分别为 314.2、310.9、307.6、301.4 kg。碳排放量随取代率的提高而降低的主要原因为再生粗骨料运输和混凝土碳化作用。

3) 对比普通混凝土,在上海地区使用再生混凝土具有降低碳排放量的潜力,从减排的角度来看,推广再生混凝土将产生一定的环境价值。

4) 对于再生混凝土,除了使用过程中会吸收 CO_2 外,存放期间也存在碳化现象,该部分 CO_2 吸收量有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 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,2003,25(4):17-20,23. DOI:10.3321/j.issn:1671-4431.2003.04.006.
Wan Huiwen, Shui Zhonghe, Lin Zongshou, et al. Environmental assessment for regenerated concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(4): 17-20, 23. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4431.2003.04.006. (in Chinese)
- [2] 徐亦冬,吴萍,周士琼.粉煤灰再生混凝土生命周期评价初探[J].混凝土,2004(6):29-32. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2004.06.009.
Xu Yidong, Wu Ping, Zhou Shiqiong. Preliminary study of life cycle assessment of recycled concrete containing fly ash [J]. *Concrete*, 2004(6): 29-32. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2004.06.009. (in Chinese)
- [3] Wu P, Xia B, Zhao X. 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. DOI:10.1016/j.rser.2014.04.070.
- [4] 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.
Li Xiaodong, Wang Shuai, Kong Xiangqin, et al. Life cycle assessment of environmental impacts of ready-mixed concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(1): 132-138. (in Chinese)
- [5] 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. DOI:10.1111/j.1530-9290.2011.00415.x.
- [6] 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. DOI:10.3321/j.issn:1673-2049.2008.03.013.
Xiao Jianzhuang, Lei Bin. Carbonation model and structural durability design for recycled concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2008, 25(3): 66-72. DOI: 10.3321/j.issn:1673-2049.2008.03.013. (in Chinese)
- [7] 李春晖.复掺矿物掺合料混凝土碳化性能研究[D].西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2009.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Tokyo, Japan: the National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006.
- [9] Li C, Cui S P, Nie Z R, et al. The LCA of portland cement production in China [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(1): 117-127. DOI:10.1007/s11367-014-0804-4.
- [10] 丁宁,杨建新.中国化石能源生命周期清单分析[J].中国环境科学,2015,35(5):1592-1600. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2015.05.041.
Ding Ning, Yang Jianxin. Life cycle inventory analysis of fossil energy in china [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(5): 1592-1600. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2015.05.041. (in Chinese)
- [11] 高育欣,王军,徐芬莲,等.预拌混凝土绿色生产碳排放评估[J].混凝土,2011(1):110-112. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2011.01.032.
Gao Yuxin, Wang Jun, Xu Fenlian, et al. Carbon emissions assessment of green production for ready-mix concrete [J]. *Concrete*, 2011(1): 110-112. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2011.01.032. (in Chinese)
- [12] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete [J]. *Waste Management*, 2010, 30(11): 2255-2264.
- [13] Li C, Cui S P, Gong X Z, et al. Life cycle assessment of heavy-duty truck for highway transport in China [J]. *Materials Science Forum*, 2014, 787: 117-122. DOI:10.4028/www.scientific.net/msf.787.117.
- [14] Lee S H, Park W J, Lee H S. Life cycle CO_2 assessment method for concrete using CO_2 balance and suggestion to decrease CO_2 of concrete in South-Korean apartment [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 58(2): 93-102. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.11.034.
- [15] 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,2005,37(11):1507-1510. DOI:10.3321/j.issn:0367-6234.2005.11.015.
Li Xiaodong, Wu Xing, Zhang Zhihui. Study on social WTP for environmental impacts based on the LCA theory [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(11): 1507-1510. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2005.11.015. (in Chinese)