

混凝土 CO₂ 排放计算和评价的研究进展

岑晓倩, 张亚庆

(凯里学院, 贵州 凯里 556011)

摘要: 由于碳排放是引起温室效应的主要原因, 减少混凝土二氧化碳排放量是非常必要的, 国内外学者对混凝土碳排放的计算和评价做了大量研究, 但侧重点各有不同。从混凝土碳排放计算和混凝土碳排放评价两方面进行了综述分析, 结果表明: 混凝土的计算与评价基于生命周期法, 辅助胶凝材料代替水泥能减少混凝土的碳排放, 但基于碳排放的混凝土配合比优化方法还需改进, 并加大对混凝土生命周期碳排放最少胶凝材料替代率的研究, 以期减少混凝土碳排放的进一步研究和应用提供参考。

关键词: 混凝土 CO₂ 排放; 碳排放计算; 碳排放评价

中图分类号: X322

文献标识码: A

文章编号: 1674-9944(2022)20-0136-06

DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2022.20.028

Research Progress in Calculation and Evaluation of CO₂ Emissions From Concrete

Cen Xiaolian, Zhang Yaqing

(Kaili University, Kaili, Guizhou 556011, China)

Abstract: Because carbon emission is the main cause of greenhouse effect, it is very necessary to reduce concrete carbon emission. Scholars at home and abroad have done a lot of research on the calculation and evaluation of concrete carbon emission, but the emphasis is different. This study summarizes and analyzes concrete carbon emission calculation and concrete carbon emission evaluation, and it can be obtained as follows: concrete calculation and evaluation is based on life cycle method. Auxiliary cementitious materials can replace cement to reduce the carbon emissions of concrete, but the concrete mix proportion optimization method based on carbon emissions still need to be improved and increased the life cycle of concrete replacement rate of carbon emissions at least cement materials research in order to reduce carbon emissions and application, which will provide the reference for further research.

Key words: concrete CO₂ emissions; carbon emission calculation; carbon emission evaluation

1 引言

由于碳排放是引起温室效应的主要原因, 建筑业的碳排放在全球总碳排放中接近 50%, 低碳建筑已成为时代发展的趋势。混凝土是建筑业最常用的建筑材料之一^[1], 混凝土生产过程从生产水泥、骨料、外加剂等材料阶段到制造阶段, 均会排放大量的 CO₂, 尤其是水泥生产过程中的二氧化碳排放对环境的影响是最大, 这些二氧化碳排放主要由于煤矿生产和运输、化石燃料燃烧的间接排放以及碳酸钙(CaCO₃)煅烧到氧化钙(CaO)的直接排放造成的, 混凝土排放量占建筑总排放量的 82%。随着中国城市化建设的发

展, 混凝土产量也在逐年增加, 其碳排放占全国 CO₂ 排放总量的 18%~22%。因此, 减少混凝土二氧化碳碳排放量是非常有必要的。

对于混凝土生产过程中 CO₂ 的排放量进行评估国内外学者做了大量研究, 但侧重点各有不同^[2]。主要分为一种混凝土碳排放研究和不同类型的混凝土碳排放的研究, 主要强调混凝土生产过程的碳排放研究和如何减少混凝土的碳排放。混凝土的环境负担并不局限于某一特定生命周期阶段的二氧化碳排放, 在评估混凝土生产过程的环境影响时, 重要的是要关注材料的整个生命周期。为了减少与典型混凝土生产有关的负面影响, 水泥和混凝土行业在过去几十年

收稿日期: 2022-07-11

基金项目: 凯里学院博士专项课题(编号: BS202003)

作者简介: 岑晓倩(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为低碳建材。

里一直致力于增加替代水泥的胶凝材料^[3],主要是工业副产品,从而使一种混凝土具有相同的性能,但对环境的影响更低^[4]。本研究围绕混凝土碳排放计算和混凝土碳排放评价进行了分析,以期减少混凝土碳排放进一步研究和应用提供参考。

2 混凝土碳排放计算的研究进展

2.1 从生产过程的角度来计算

在地理信息系统的研究基础上,Hughes^[5]提出了可以筛选不同的材料运输路线来优化因为运输而产生的不必要的碳排放。在此基础上,Radlinski^[6]提出了更加系统的全环节碳排放足迹,包括混凝土原材料加工,成品生产、运输,混凝土结构设计、施工、使用

及维护等,只不过在碳排放计算环节并未给出具体的计算方案。在国内,高育新等^[7]也进行了相关研究,在没有计算原材料运输环节,只计算了原材料的添加以及混凝土加工和运输的碳排放,得出了 C30 砼碳排放量平均值为 187.9 kg/m³。Flower and Sanjayan^[8]对混凝土生产过程的碳排放进行了计算。García—Segura 等^[9]从“摇篮到坟墓”对混凝土 CO₂ 进行计算,考虑了碳化和耐久性的因素,将拆除的混凝土碾碎并填充材料回收,碳化可以减少一半的二氧化碳排放量。一些学者从混凝土的生产环节来研究,如孙楠楠^[10]从运输及碳化对生命周期碳排放的影响研究(表 1)。

表 1 文献给出的混凝土不同阶段碳排放的研究

文献	研究阶段				
	原材料生产阶段	原材料运输阶段	混凝土生产阶段	混凝土使用阶段	混凝土拆除阶段
[1]		▲			
[2]	▲	▲	▲	▲	▲
[3]	▲	▲	▲		
[4]			▲		
[5]	▲	▲	▲	▲	▲
[6]		▲			
[7]	▲	▲	▲		
[8]			▲		
[9]	▲	▲	▲	▲	▲
[10]	▲	▲	▲	▲	▲

通过表 1 可以得出,研究目的不同,各研究学者对混凝土碳排放的研究阶段也是不同的,主要包括混凝土原材料生产阶段、混凝土原材料运输阶段、混凝土生产阶段、混凝土使用阶段和混凝土维护拆除阶段。研究范围差异取决于混凝土是作为建筑材料还是作为建筑物的构件。

2.2 不同类型混凝土碳排放的计算

为了减少与典型混凝土生产有关的负面影响,水泥和混凝土行业在过去几十年里一直致力于增加替代水泥的胶凝材料,主要是工业副产品,从而使一种混凝土具有相同的性能,但对环境的影响更低。例如粉煤灰(Fly Ash,FA)和高炉矿渣(Ground—Granulated Blast Furnace Slag,GGBFS)。工业副产品在混凝土中的使用被认为是“混凝土工业绿化”的一个重要因素。近年来,随着粉煤灰的加入,混凝土对环境影响的研究越来越多。而之前的研究已经证实,用粉煤灰和高炉矿渣代替水泥可以减少混凝土中二氧化碳的排放。

大部分学者主要研究普通混凝土碳排放的计算,由于新型混凝土的产生,一些学者也对这些混凝土的碳排放进行了研究,图 1 为文献报道的不同类型混凝土碳排放的计算。樊俊江,於林锋^[11]对再生混凝土的碳排放进行了计算,C20 再生混凝土的碳排放为

210.1 kg/m³;Celik 等^[12]对混凝土的碳排放进行了计算,C25 和 C30 混凝土的碳排放分别为 231.3 kg/m³ 和 255.6 kg/m³。Haber 等^[13]通过对地聚物和普通硅酸盐混凝土原材料生产阶段、运输阶段和混凝土生产阶段进行比较,研究结果表明 1 m³ 地聚物混凝土的碳排放比普通硅酸盐混凝土少 9%。McLellan 等^[14]对澳大利亚普通硅酸盐混凝土和地聚物混凝土的生命周期成本和碳排放进行了研究,与 OPC 相比,一些案例表明地质聚合物混凝土混合料的温室气体排放减少 44.64%,成本降低最低为 7%,而最高达到 39%。Marinković 等^[15]对再生混凝土骨料和天然骨料制成的混凝土结构混凝土进行比较环境评价,结果表明,与天然骨料混凝土相比,再生骨料混凝土的生态效应较好。Kim 等^[16]针对高强混凝土提出其环境影响值计算理论,通过大量数据计算得出结论,高强混凝土在二氧化碳排放和能源消耗上分别减少了 17%和 16%。

2.3 掺和物混凝土的碳排放

混凝土的主要环境影响来自于水泥生产过程中煅烧和碾磨过程排放的二氧化碳,降低水泥熟料掺量可能对混凝土环境生命周期评价产生积极影响。一些学者从混凝土水泥替代掺和料来分析对碳排放的影响,如辅助胶凝材料(粉煤灰、矿渣和硅粉)对混凝

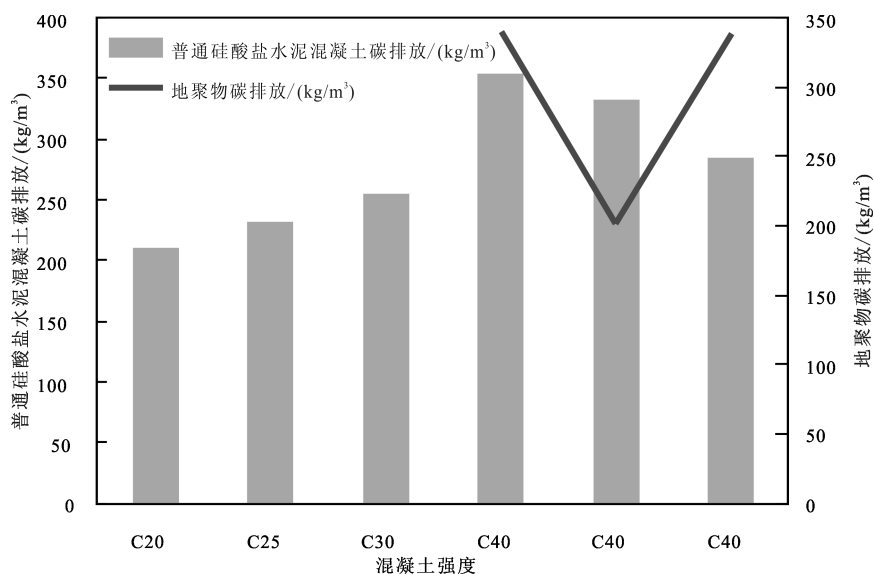


图1 不同类型混凝土碳排放的计算(数据来源于文献[23~28])

土碳排放的影响(Yang^[17], García - Segura^[9]), 详见图2。粉煤灰作为水泥的替代品, 虽然会降低混凝土的强度发展速度, 但可以提高混凝土的强度和耐久性, 以及减少温室气体的影响。在预制混凝土中使用粉煤灰替代18%的硅酸盐水泥, 从而减少25%的温室气体排放^[18]。另外一种常用的辅助胶凝材料是高炉生铁的副产品—高炉矿渣, 它是在生铁的生产过程中, 通过与炉渣、炉渣和杂质的反应而从生铁中分离出来的。Crossin^[19]指出在不限磨粒高炉矿渣(Ground-Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS)供应的情况下, 给定的GGBFS混凝土混合料的温室

效应减排量约为47.5%。Purnell 和 Black^[20]研究水泥替代物和骨料形状对碳排放的影响。

通过图2, 可以得出, 辅助胶凝材料代替水泥都能减少混凝土的碳排放, 因为混凝土的水泥量减少。但是不同掺和料对混凝土碳排放的影响是不同的, 这与掺和料本身的特性及生产过程有关; 同一种掺和料对混凝土碳排放的影响也是不同, 这是因为不同研究者选择研究对象不同, 如选择混凝土的强度来比较, 同一掺和料的掺量不一样, 还有计算碳排放的生命周期范围不一样。

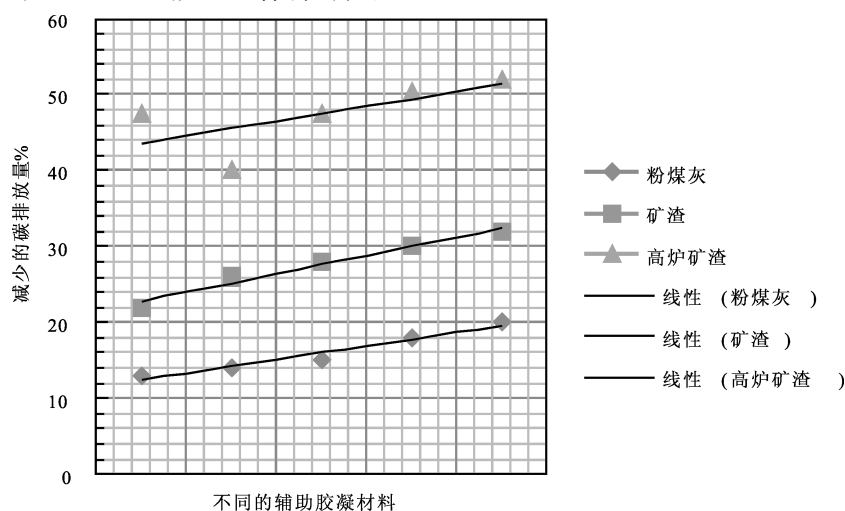


图2 不同辅助胶凝材料对混凝土碳排放的影响(数据来源于文献[10~20])

3 混凝土碳排放评价的研究进展

3.1 混凝土碳排放评价模型

总的来说, 混凝土生产过程的二氧化碳排放分为两类: 一类是简单地从原材料中提取的碳化合物, 在

制造过程中转化为二氧化碳, 被称为“原材料 CO₂”, 而另一类是由燃烧化石燃料产生的二氧化碳则是驱动制造过程所必需的, 通常被称为“燃料衍生二氧化碳”。前者比后者更容易预测, 因为人们通常非常精确地知道原材料和产品的成分。适当了解和认识建

筑材料的内含能源含量,不仅可以鼓励使用低内嵌能源材料的生产和开发,而且可以鼓励建筑设计和工业优先使用这些材料,以限制能源的使用和二氧化碳的排放。

通过表 2,可以得出,完全针对混凝土建立碳排放评价模型的研究还是比较少的,较多的学者是以建筑物作为研究对象,并且评价模型往往把碳排放和成本共同进行研究。这些模型的机理一般分为四类:第一类是生命周期评价法;第二类是基于生命评价法开发的软件,如 BEE, BEES 等;第三类是数学模型,如遗传算法、灰色系统等;第四类就是前面三类的相互结合,如遗传算法和生命周期评价法的结合。

表 2 文献给出的混凝土碳排放评价模型的研究

文献	模型名称	机理
[21]	混凝土梁碳排放模型	BEE 4.0 评估软件
[22]	混凝土成本和二氧化碳排放(IMACC)综合模型	经济 and 环境的得分法
[23]	钢筋混凝土柱成本和碳排放优化模型	遗传算法和生命周期评价法
[24]	混凝土桥梁全寿命周期评估和全寿命周期成本分析的综合模型	生命周期评价法(LCA)
[25]	低碳建筑全生命周期碳排放模型	生命周期评价法(LCA)
[26]	预制装配建筑的全生命周期碳排放评价模型	生命周期评价法(LCA)
[27]	混凝土碳排放模型	数学统计法
[28]	施工阶段碳排放的生命周期影响评价模型	生命周期评价法(LCA)
[29]	建筑施工碳足迹核算系统	工程量清单和生命周期评价法(LCA)
[30]	建筑材料碳足迹模型	BEES 和 BIM

LCA 方法已被发现是一种极好的工具,用于比较不同混凝土混合物的情况,以寻找最佳掺量的替代矿物掺合料,寻求最低的环境影响。20 世纪 90 年代,生命周期评价的概念首次由国际环境毒理学和化学学会(SETAC)提出,它是一种产品、工艺过程或活动对环境产生的影响进行量化计算和评价的过程,是评价产品、工艺过程或活动消耗的能量、物质对环境影响的过程,也是如何有效改善或减少环境影响的过程。LCA 的使用是根据 ISO 14040 标准进行的,该标准提供了一个一致同意的框架、术语和方法阶段。

一种产品、工艺过程或活动在其生命周期的全活动都属于生命周期的评价范畴,往前可以追溯到原材

3.2 基于 LCA 的碳排放评价方法

我国常用的建筑材料 CO₂ 排放计算方法有实测法、质量平衡法、碳排放因子法和生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)。实际测量法和质量平衡法虽然科学、准确,但对设备或技术要求较高;政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的碳排放因子法虽然方便,但也有其局限性,如不同排放因子来源的数据差异较大^[31,32]。现有研究成果表明,基于生命周期评价法对建筑材料 CO₂ 排放进行计算是一种更合适的方法。这 4 种 CO₂ 排放计算方法的优缺点具体见表 3。

料采购、粗加工、细加工,往后可以追溯到产品或过程的使用全过程以及循环再利用研究。在国际环境毒理学和化学学会研究中,分成了四步来评价产品或过程的全生命周期,具体包括确定目标范围确定、清单分析、影响评价以及改善评价。目标和范围确定了研究的目的、目标、产品系统、边界和功能单元,在清单分析中,收集了分析产品生命周期所需的数据,在影响评估中,使用生命周期影响评估(LCIA)方法对生命周期库存(LCI)进行分类、表征和规范化,以评估潜在的环境影响,最后的改善评价阶段的作用有两个:①识别、量化和评估最后两个阶段的结果;②对分析的系统提出改进建议。

表 3 建筑材料碳排放计算不同方法的比较

文献	方法	原理	优点	缺点	精确度
[33]	实际测量方法	通过监控设备等仪器测量流速、流速率、排放气体浓度,经环保部门认可的测量数据计算 CO ₂	最大限度地反映实际情况	对实验条件、数据采集处理和数据分析方法提出严格要求,受样品影响较大	计算准确
[34]	质量平衡方法	对使用的材料进行定量分析,通过化学原理中的元素平衡,从而得到 CO ₂ 排放量	全面、科学、有效	在化学成分复杂的情况下,很难对活性数据进行分类检测,分类成本过高	计算准确
[35]	碳排放系数法	CO ₂ 排放量=有效数据×排放因子	计算方便、直观;高度可靠	排放因子具有很大的多样性,需要详细的有源数据	计算相对准确
[36,37]	生命周期评价法	包含目标范围确定、清单分析、影响评价、改善评价 4 个步骤,对产品、工艺过程或活动的整个生命周期评价。	科学、完整地界定碳排放计量	计量范围的确定合理;清单分析要求准确	计算相对准确

清单分析是最重要的一个环节,是对生命全周期过程中物质和能量流动的抽象和概括,是对产品、工艺过程或活动在其整个生命周期中的资源、能量和环境排放(废水、废气以及固体废物)的定量分析。该分析方法的关键是根据产品功能单元建立产品系统投入产出。该分析方法可分为基于过程清单分析、基于经济投入产出分析的清单分析以及混合式清单分析^[33]。这些方法在收集材料生产和过程中能量输入的数据方面各有不同,各有优缺点。Cabeza 等^[34]认为不完整和不准确是两个相关的关键问题。

过程分析法是一种自下而上的 LCA 方法,主要用于建筑物单体的生命周期评价,强调从微观的角度对建筑物生命周期进行分析。Gustavsson 等^[35]基于过程分析法分析了八层木结构公寓大楼的生命周期初级能源消耗和二氧化碳的排放,其生命周期主要分为原材料生产阶段、施工阶段、拆除和处理阶段,研究结果表明,木结构建筑生命周期能量消耗和碳排放最大的阶段是使用阶段。Yan 等^[4]对香港一幢大楼建筑施工期间的碳排放进行研究,碳排放主要包括建筑材料的制造和运输,能源消耗建筑设备、处理资源的能源消耗和建筑垃圾处理。

基于 LCA 的碳排放评价法逐渐成为建筑项目环境评价的基本方法,也是建筑材料选择、施工设备选择、构件类型选择等普遍认可的标准^[36]。在生命周期评价大框架下,项目评价范围是第一步需要明确的,并且需要结合项目的特性和现有的数据适当的取舍。如 Ochoa^[37]仅从原材料获取、生产制造和运输阶段对居住建筑的碳排放进行了评价,而不考虑建设过程。谷立静^[38]认为在建筑全生命周期阶段中都会消耗能源,能源的计算可以按照建筑材料生产、建筑建造、后期维护以及拆除处置 4 个阶段关联起来研究。Napolano 等^[39]基于生命周期评价法对建筑物生命周期的碳排放进行了研究,将建筑物评价范围分为设计阶段、材料生产阶段、运输阶段、施工阶段、使用阶段和维修、拆除和废弃物处理等阶段。Hong 等^[40]认为建筑物生命周期阶段评价范围应包括原材料的开采,建设材料和设备生产,施工安装、运行维护和拆除的过程。

此外,有的学者在将 LCA 理论与其他理论相结合上提出了新的评价系统,如张智慧等^[41]将生命周期评价(LCA)和支付意愿理论(WTP)相结合,构建了建筑工程环境影响评价系统,其优点是明确各类环境影响的权重。张智慧教授的团队还将该系统应用于防水材料、水泥和预拌混凝土的生命周期环境影响的比较。除了以上基于 LCA 方法的碳排放计算,有的学者还从工程量清单来计算混凝土的碳排放^[42]。

4 结语及建议

(1)结合上述分析,国内外学者更倾向于对建筑物的碳排放进行研究,而针对混凝土的碳排放研究较少。部分学者已对混凝土配合比设计进行了研究,讨论了混凝土配合比设计方法和程序开发的方法,如遗传算法,以满足混凝土的性能和尽量减少材料的使用,但以往的优化方法,需要大量的实验数据,将浪费大量的人力物力,因此需要引入一种新的优化方法节省时间、节约资源。

(2)利用粉煤灰和磷矿渣等工业废渣替代水泥成为减少混凝土碳排放的主要手段,但替代率为何值时才能保证混凝土生命周期碳排放最少,目前研究甚少。因此寻找碳排放最少的最优配合比可以作为一个今后重要的研究方向。

参考文献:

- [1] Aitcin P, Mindess S. Sustainability of Concrete (Modern Concrete Technology)[M]. London, UK: Spon Press, 2011.
- [2] Cellura M, Longo S, Mistretta M. Sensitivity analysis to quantify uncertainty in life cycle assessment: the case study of an Italian tile [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4697-4705.
- [3] Zhang Y R, Wu, W J, Wang Y F. Bridge life cycle assessment with data uncertainty[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(4): 569-576.
- [4] Hui Yan, Qiping Shen, Linda C. H, et al. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong[J]. Building and Environment, 2010, 45(4): 949-955.
- [5] Hughes P N, Glendinning S, Manning D A C, et al. Production of 'green' concrete using red gypsum and waste[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 2010, 163(3): 137-146.
- [6] Radlinski M, Olek J, Nantung T. Effect of Mixture Composition and Initial Curing Conditions on Scaling Resistance of Ternary (OPC/FA/SF) Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(10): 668.
- [7] 高育新, 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.
- [8] Flower D, Sanjayan J. Green house gas emissions due to concrete manufacture[J]. The international Journal of life cycle assessment, 2007, 12(5): 282.
- [9] Garcia-Segura T, Yepes V, Alcalá J. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(1): 3-12.
- [10] 孙楠楠. 运输及碳化对 RAC 生命周期碳排放的影响研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [11] 於林峰, 樊俊江. 再生混凝土的碳排放计算与分析[J]. 粉煤灰, 2016, 4: 32-34.
- [12] Celik K, Meral C, Petek Gursel A, et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly

- ash and limestone powder[J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 56: 59—72.
- [13] Habert G, Ouellet P C. Recent update on the environmental impact of geopolymers [J]. RILEM Technical Letters, 2016, 1: 17.
- [14] Mclellan B C, Williams R P, Lay J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 9—10 (19): 1080—1090.
- [15] Marinkovi S B, Maleev M, IgnjatoviI. Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates[J]. Eco—efficient Construction and Building Materials, 2014: 239—266.
- [16] Kim T, Tae S, Roh, S. Assessment of the CO₂ 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, Elsevier, 2013, 25: 729—741.
- [17] Yang K, Jung Y, Chao M, et al. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 774—783.
- [18] Artenian A, Sadeghpour F, Teizer J. A GIS Framework for Reducing GHG Emissions in Concrete Transportation[J]. Construction Research Congress, 2010(10): 1557—1566.
- [19] Crossin E. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 95: 101—108.
- [20] Purnell P, Black L. Cement and Concrete Research Embodied carbon dioxide in concrete: variation with common mix design parameters[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(6): 874—877.
- [21] Marinkovi S B, Maleev M, Ignjatovi I. Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates[J]. Eco—efficient Construction and Building Materials, 2014: 239—266.
- [22] Tae S, Baek C, Shin S. Life cycle CO₂ evaluation on reinforced concrete structures with high—strength concrete[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2011, 31(3): 253—260.
- [23] Yang K, Jung Y, Chao M, et al. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 774—783.
- [24] García—Segura T, Yepes V, Alcalá, J. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(1): 3—12.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Zhang Y L. Assessment of carbon dioxide emissions and cost in fly ash concrete. In Environment: International, Applied Technology Proceedings of Engineering Conference[Z]. ICIEEE Sung W—P And Kao JCM Eds CRC Press, BocaRaton, FL USA Pp. : 2014.
- [28] Hong T H. Predicting the CO₂ Emission of Concrete Using Statistical Analysis[J]. Journal of Construction Engineering and Project Management, 2012, 2(2): 53—60.
- [29] Miller S A. Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing? [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 587—598.
- [30] Kim T, Tae S, Roh S. Assessment of the CO₂ 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.
- [31] 王思博. 水泥行业温室气体排放核算方法研究[D]. 中国社会科学院研究生院, 2012.
- [32] 李 兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 华中科技大学, 2012.
- [33] Purnell P B L. Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(6): 874—877.
- [34] Cabeza L F, Barreneche C, Miró L, et al. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 23: 536—542.
- [35] Gustavsson L J A, Sathre R. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight—storey wood—framed apartment building[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(2): 230—242.
- [36] Shao L, Chen G Q, Chen Z M, et al. Systems accounting for energy consumption and carbon emission by building[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19 (6): 1859—1873.
- [37] Ochoa L, Hendrickson C, Matthews H S. Economic input—output life—cycle assessment of US residential buildings[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2002, 8(4): 132—138.
- [38] 谷立静. 基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究[D]. 清华大学, 2009.
- [39] Napolano L, Menna C, Graziano S F, et al. Environmental life cycle assessment of lightweight concrete to support recycled materials selection for sustainable design [J]. Construction and Building Materials, 2016, 119: 370—384.
- [40] Hong T, Ji C, Jang M, et al. Assessment model for energy consumption and greenhouse gas emissions during building construction[J]. Journal of Management in Engineering, 2013, 30(2): 226—235.
- [41] 张智慧, 尚春静, 钱 坤. 建筑生命周期碳排放评价[J]. 建筑经济, 2010(2): 44—46.
- [42] 李小冬. 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.