

建筑材料全寿命期 CO₂ 排放量计算方法

张 涛^{1, 2}, 吴佳洁³, 乐 云¹

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092, E-mail: geraldch@163.com; 2. 苏州市住房和城乡建设局, 江苏 苏州 215002;
3. 东南大学 土木工程学院项目管理研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 建筑材料 CO₂ 减排是我国整体 CO₂ 减量计划的重要方面, 建筑材料 CO₂ 排放量的计算是发展低碳建材、推进建筑节能减排的前提和基础, 为此需要确立建筑材料 CO₂ 排放量的计算方法。通过 CO₂ 排放活动分析, 从全寿命期和 CO₂ 排放源角度, 确定了建筑材料 CO₂ 排放构成; 并对六种建筑材料 CO₂ 排放量的计算方法进行了比较分析, 选择碳排放系数法作为计算我国建筑材料 CO₂ 排放量的方法; 构建了建筑材料全寿命期 CO₂ 排放三阶段计算模型, 并提出了建筑材料生产、运输以及处置阶段 CO₂ 排放因子的确定方法。应用实例显示, 该方法可较方便地测算出建筑材料全寿命期 CO₂ 排放量。

关键词: 建筑材料; 全寿命期; CO₂ 排放量; 水泥

中图分类号: TU5, X781 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-8859 (2012) 01-023-04

Life-cycle CO₂ Emission Calculation Method of Building Materials

ZHANG Tao^{1, 2}, WU Jia-jie³, LE Yun¹

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China, E-mail: geraldch@163.com;
2. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Suzhou, Suzhou 215002, China;
3. Project Management Research, College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: CO₂ emission reduction of building materials is the important aspect of CO₂ reduction plan in china. The CO₂ emission calculation of building materials is the foundation of low carbon materials and energy conservation. It is necessary to establish CO₂ emission calculation method of building materials. In this paper, CO₂ emissions activities of building materials are analyzed. The composition of CO₂ emissions of building materials is determined from life-cycle and sources of CO₂ emissions. On the basis of contrast and analysis of the different six methods, the Carbon Emission Coefficient Method was chosen as the CO₂ emission calculation method of building materials. The life-cycle CO₂ emission calculation model of building materials is built from three stages, and the determinant emission factors are proposed, including the stages of production, transportation and disposal. Case study shows that the method proposed in this paper is more convenient to measure the life-cycle emissions of building materials.

Keywords: building materials; life-cycle; CO₂ emission; cement

相关资料表明, 国内建筑材料碳排放占建筑全寿命期碳排放的 9% ~ 12%^[1, 2]; 我国台湾地区这一比例为 9.15% ~ 22.22%^[3]; 日本为 15.67% ~ 22.69%^[4]。可见, 建筑材料 CO₂ 排放是建筑全寿命期 CO₂ 总排放的主要来源之一。在全球减量趋势中, 建筑材料 CO₂ 减量工作也将成为我国整体 CO₂ 减量计划中的重要一环。

目前研究中, 尚春静等对建筑碳排放定量研究时涉及到建筑材料碳排放^[5], 罗智星在建筑材料消耗能源的基础上, 研究了建筑材料生产阶段 CO₂ 排放计算方法^[6], 龚志起定量评价了我国水泥、钢材、平板玻璃和 PVC 管材 4 种建筑材料在物化阶段的环境影响^[7]。研究仅是确定建筑材料生产阶段的 CO₂ 排放, 并且一般是以自己获得的碳排放数据进行研究, 但同一种建材不同研究机构 and 人员发布的排放因子有较大差异。根据目前产品碳排放评价通常采用的英国标准协会 (BSI) 2008 年出版的 PAS

收稿日期: 2011-11-27.

基金项目: 住房和城乡建设部 2010 年科学技术项目计划 (2010-R2-28).

2050 标准, 应计算建筑材料全寿命期碳排放量, 因此, 本文基于 CO₂ 排放源及 CO₂ 排放活动分析, 确立建筑材料全寿命期 CO₂ 排放计算模型; 在 CO₂ 排放因子选择上, 制定选取准则, 对各权威机构和人员公布的数据进行比较与选择。

1 建筑材料全寿命期 CO₂ 排放活动分析

建筑材料全寿命期 CO₂ 排放活动不仅包括 CO₂ 排放, 还包括 CO₂ 清除。CO₂ 排放指 CO₂ 向大气中的释放, CO₂ 清除指去除或阻止 CO₂ 排放。要对 CO₂ 排放活动进行分析, 则需确定系统边界, 即确定建筑材料 CO₂ 排放源及 CO₂ 排放构成。

从全寿命期角度, 建筑材料活动包括原材料开采、运输、加工制造、运输、工程应用、废弃处置及回收利用, 每一过程都有 CO₂ 排放或 CO₂ 清除。从 CO₂ 排放源分类上, 基于活动分析的建筑材料 CO₂ 排放源包括输入流和输出流, 输入流指进入一个活动过程的能源消耗、物质消耗, 输出流则包括离开一个活动过程的 CO₂ 排放或 CO₂ 清除。图 1 为建筑材料全寿命期 CO₂ 排放活动分析, 可以看出, 计算建筑材料全寿命期 CO₂ 排放关键在于收集整理各个活动阶段的 CO₂ 排放数据, 包括活动数据与

CO₂ 排放因子。

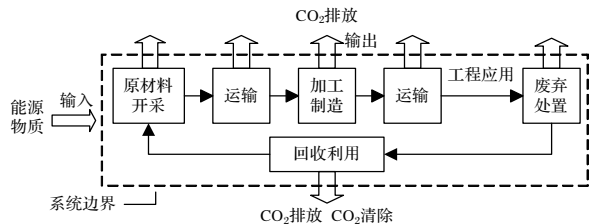


图 1 建筑材料全寿命期 CO₂ 排放活动过程与系统边界

由于建筑材料回收利用运用并不广泛, 本文对回收利用带来的 CO₂ 清除不作详细探讨, 而仅研究建筑材料全寿命期过程带来的 CO₂ 排放。

2 建筑材料 CO₂ 排放量计算方法选择

目前, 日本已经建立起建筑材料和建筑设备生产所产生的 CO₂、SO_x、NO_x、CH₄、N₂O 的排放数据库^[4], 台湾已建立建筑相关产品 CO₂ 排放量数据库^[3], 采用的主要方法包括产业关联表统计法、限定间接需要算入法和生产线直接能耗统计法 3 种。常用的 CO₂ 排放计算方法则为实测法、质量平衡法和碳排放系数法, 本文将常用的 3 种方法与台湾、日本采用的 3 种方法对比如表 1 所示。

表 1 建筑材料 CO₂ 排放计算方法比较

方法	原理	优点	缺点	准确性
常用 CO ₂ 排放计算方法				
实测法	通过监测手段测量排放气体的流速、流量和浓度, 用环保部门认可的测量数据来计算气体的 CO ₂ 排放量	最能反映实际, 最准确	对实验条件及数据收集处理与分析方法要求高, 受样品影响大	准确计算
质量平衡法	通过化学原理中的元素平衡对生产过程中使用的物料情况进行定量分析得到 CO ₂ 排放量	全面科学有效	化学成分复杂时, 活动数据难以分类检测, 且分类成本过高	准确计算
碳排放系数法	CO ₂ 排放量=活动数据×排放因子	计算方便直接, 可信度高	排放系数差异性较大, 需详细的活动数据	计算较准确
台湾、日本建材 CO ₂ 排放计算方法				
产业关联表统计法	利用产业关联表中的内容, 以建筑产业的需求量与建筑材料消耗量为基础求出其他建筑材料产业与能源产业的产值、产量直接或间接的波及效果, 并因此求出 CO ₂ 排放量	计算简便	无法准确计算, 可信度低	粗略估算
限定间接需要算入法	去除产业关联表中间接关联因素而进行统计并求出 CO ₂ 排放量	可信度较高	只能求出该建材产业的平均 CO ₂ 排放量	粗略估算
生产线直接能耗统计法	直接由建筑材料制造商的产量与能耗结构算出 CO ₂ 排放量	直接可靠	统计数据庞大、困难	准确计算

由表 1 分析可知, 产业关联表统计法、限定间接需要算入法仅用于粗略估算, 与本文主旨不符; 若建筑材料生产商愿意配合调查, 且生产线能耗结构能明确统计, 那么采用生产线直接能耗统计法计算建筑材料 CO₂ 是最直接可靠的, 但由于国内基础数据工作缺乏, 该方法在国内实施起来较为困难; 实测法与质量平衡法虽然计算科学准确, 但需要高级设备或技术, 更多适用于建筑材料生产商或科研

机构以获得基础数据库; 而政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 推荐的碳排放系数法计算直接简便, 目前已有一些权威机构、专题研究以及文献发布了建筑材料 CO₂ 排放因子, 本文是在建筑 CO₂ 排放背景下分析建筑材料 CO₂ 排放量的计算, 可以这些研究成果为基础。因此, 本文选择碳排放系数法计算建筑材料 CO₂ 排放量, 即:

建筑材料 CO₂ 排放量 = 活动数据 × 排放因子

式中,活动数据即为材料用量,排放因子又称排放系数,是指在正常技术经济和管理条件下,生产单位产品所排放的CO₂数量统计平均值^[7]。

3 基于活动分析的建筑材料全寿命期 CO₂ 排放计算模型

3.1 建筑材料 CO₂ 排放计算模型

目前,部分学者在研究CO₂排放的过程中,将建筑的寿命期与建筑材料的物质流相结合来考虑建筑CO₂排放量,本文综合借鉴陈莹等计算住宅建筑生命周期环境排放的模型^[8]以及刘念雄等计算城市住区CO₂排放量的模型^[2],在建筑材料全寿命期CO₂排放活动分析的基础之上,构建了建筑材料全寿命期CO₂排放量计算模型(为简化计算,本文将建筑材料的原材料开采、运输、加工制造视为建筑材料的生产阶段)为:

$$M_n = M_1 + M_2 + M_3$$

式中, M_n 为建筑材料全寿命期CO₂排放量; M_1 为建筑材料生产阶段CO₂排放量; M_2 为建筑材料运输阶段CO₂排放量; M_3 为建筑材料处置阶段CO₂排放量。

$$M_1 = (1 + \varphi_1) \times Q_M \times C_{M1} \times (1 - s)$$

式中, Q_M 为建筑材料的使用数量; C_{M1} 为建筑材料生产阶段CO₂排放因子; φ_1 为建筑材料因工艺损耗等原因造成废弃的废弃系数。 s 为建筑材料的回收利用系数,目前可回收利用的建筑材料主要有钢材和铝材^[9]。

$$M_2 = (1 + \varphi_2) \times Q_M \times C_{M2}$$

式中, Q_M 为建筑材料的使用数量; C_{M2} 为建筑材料运输阶段CO₂排放因子; φ_2 为因运输造成损耗的损耗系数。

$$M_3 = Q_S \times C_{M3}$$

式中, Q_S 为建筑材料处置量; C_{M3} 为建筑材料处置阶段CO₂排放因子。

3.2 CO₂ 排放因子的确定

3.2.1 建筑材料生产阶段 CO₂ 排放因子 C_{M1}

目前,已有国内国际检测机构、行业贸易协会技术论文(如报告、指南、标准、部门调查或类似技术资料)及专题研究和论文文献发布了建筑材料CO₂排放因子,核算人员应选取最容易获取准确活动数据的排放因子以及最能被认可的排放因子,本文按以下原则进行选取和确定 C_{M1} :

(1) 最接近真实状况的排放因子,如特定于特定技术、地区、区域、省或州的排放因子,组织

或机构发布的CO₂排放因子优于个人文献。

(2) 相似或可比较的经验排放因子,如特定于一个国家或国家区域的排放因子,组织或机构发布的CO₂排放因子优于个人文献。

(3) 国际间使用的平均排放因子。

3.2.2 建筑材料运输阶段 CO₂ 排放因子 C_{M2}

建筑材料运输阶段CO₂排放因子采用推算的方法确定,公式如下:

$$C_{M2} = L \times P \times C_P$$

式中, L 为建筑材料从工厂送至施工现场的运输距离; P 为运输单位建筑材料单位距离的能耗; C_P 为运输过程中相应燃料的CO₂排放因子。

3.2.3 建筑材料处置阶段 CO₂ 排放因子 C_{M3}

对于不可回收的建筑材料,此阶段的CO₂排放量主要来自废旧建筑材料运往垃圾处置场过程中的排放,其计算与运输过程CO₂排放因子与 C_{M2} 相同:

$$C_{M3} = L' \times P \times C_P$$

式中, L' 为建筑材料从施工现场运至垃圾处置场的运输距离; P 为运输单位建筑材料单位距离的能耗; C_P 为运输过程中相应燃料的CO₂排放因子。

对于可回收的建筑材料,则要考虑将建筑材料回收运输至工厂及再生产过程中的CO₂排放:

$$C_{M3} = L'' \times P \times C_P + C'_{M3}$$

式中, L'' 为建筑材料从施工现场运至回收工厂的运输距离; C'_{M3} 为再生产过程中的CO₂排放因子。

4 应用实例

本文以苏州市某科研实验楼为例,计算其所用水泥在生产、运输及处置阶段整个全寿命期的CO₂排放量。该实验楼为框架结构,建筑面积为4107.3 m²,地上4层,基础为钢筋混凝土带形基础,地面与楼面均为普通水磨石、地砖、花岗岩。

4.1 活动数据的确定

根据工程结算资料,水泥用量为203.98 kg/m²,此用量已考虑工艺损耗和运输损耗,因此 φ_1 、 φ_2 取0, $Q_M=203.98 \text{ kg/m}^2$

4.2 水泥 CO₂ 排放因子的确定

(1) 生产阶段。本文收集到国内外机构和文献发布的水泥生产阶段CO₂排放因子如表2^[9~14],根据确定原则,首选选取最接近真实状况的排放因子,但以下数据均无苏州或江苏的CO₂排放因子,其次选择相似或可比较的经验排放因子,绿色奥运建筑研究课题组的数据应优于其他个人文献,因此

选择其公布的 CO₂ 排放因子为本文案例中水泥生产阶段 CO₂ 排放因子 C_{M1} , 即 800 kg·t⁻¹。

表 2 水泥生产阶段 CO₂ 排放因子的确定 (kg·t⁻¹)

来源	收集的排放因子 C_{M1}
国外组织或机构 IPCC	520 (熟料)
WBCSD	525 (熟料)
国内个人文献 汪澜	653
汪静	730
高育欣	800
国内组织或机构 绿色奥运建筑研究课题组	800

(2) 运输及处置阶段。水泥运输以公路运输 (汽油) 为主, 目前视水泥为不可回收建材 ($s=0$), 以废弃处置, 则水泥处置过程的 CO₂ 排放来自运输中消耗的能源, 见表 3。

表 3 水泥运输及处置阶段 CO₂ 排放因子的确定

阶段	L (km)	P (kJ·t ⁻¹ ·km ⁻¹)	C_P (kg·kJ ⁻¹)	C_{M2}/C_{M3} (kg·t ⁻¹)
运输阶段	100	3662	6.93×10^{-5}	25.4
处置阶段	30	3662	6.93×10^{-5}	7.6

注: 1. 运输过程平均运距 L 来自文献[1], 处置过程 L' 为施工现场到垃圾处理厂距离 30Km; 2. 公路 (汽油) 运输单位建材的单位能耗 P 来自文献[1]; 3. 汽油的 CO₂ 排放因子 C_P 来自 IPCC 缺省值, 并乘上分子量 44/12 换算得到。

4.3 水泥 CO₂ 排放量的计算

假设水泥处置量为水泥使用量的 1%, 则该科研实验楼水泥全寿命期 CO₂ 排放量为:

$$\begin{aligned}
 M_n &= M_1 + M_2 + M_3 \\
 &= Q_M \times C_{M1} + Q_M \times C_{M2} + Q_S \times C_{M3} \\
 &= 203.98 \text{ kg/m}^2 \times 800 \text{ kg/t} + 203.98 \text{ kg/m}^2 \\
 &\quad \times 25.4 \text{ kg/t} + 203.98 \text{ kg/m}^2 \times 1\% \times 7.6 \text{ kg/t} \\
 &= 168.4 \text{ kg/m}^2
 \end{aligned}$$

该案例中水泥的 CO₂ 排放量为 168.4 kg/m², 其中, 97% 来自水泥生产阶段, 3% 来自运输及处置阶段。因此, 水泥行业的减排主要是在生产阶段, 应提高能源效率, 研制低碳技术, 开发低碳产品以提高质量延长其使用年限; 运输距离和运输方式则是影响运输阶段及处置阶段 CO₂ 排放的主要因素, 应尽量就近选择水泥, 采用低碳运输方式; 另外还应建立和完善相应的废物资源化政策, 推动水泥行业充分利用固体废弃物。

5 结论

本文提出的以碳排放系数法为基础的建筑材料全寿命期 CO₂ 排放量三阶段模型, 较为完善和全面, 能方便计算我国建筑材料 CO₂ 排放量, 并适用于我国现阶段进行 CO₂ 排放核算工作。本文研究也

揭示了在计算建筑材料全寿命期 CO₂ 排放量时, 需要选择和确定建筑材料活动数据、排放因子、运输距离以及回收利用系数等参数, 因此, 我国应尽早建立官方的建筑材料排放因子等相关参数数据库, 这样才能更加准确计算出 CO₂ 排放量, 从而真正解决“低碳”的量化问题。

参考文献:

- [1] 朱 熾, 陈 莹. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放案例[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2010, 50 (3): 330-334.
- [2] 刘念雄, 汪 静, 李 嵘. 中国城市住区 CO₂ 排放量计算方法[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2009, 49 (9): 1-4.
- [3] 张又升. 建筑物生命周期二氧化碳减量评估[D]. 台湾: 成功大学, 2002.
- [4] 日本建筑学会. 建物の LCA 指針[M] (3 版). 日本: 日本建筑学会, 2006.
- [5] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学, 2010, 24 (1): 7-12.
- [6] 罗智星. 建筑材料 CO₂ 排放计算方法及其减排策略研究[J]. 建筑科学, 2011, 27 (4): 1-7.
- [7] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [8] 陈 莹, 朱 熾. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放模型[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2010, 50 (3): 325-329.
- [9] 绿色奥运建筑研究课题组. 绿色奥运建筑评估体系[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [10] IPCC 2006. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[M]. 全球战略研究所, 2006.
- [11] 世界可持续发展工商理事会 (WBCSD). 水泥行业二氧化碳减排议定书水泥行业二氧化碳排放统计与报告标准[S]. 2005.
- [12] 汪 澜. 水泥生产企业 CO₂ 排放量的计算[J]. 中国水泥, 2009 (11): 21-22.
- [13] 汪 静. 中国城市住区生命周期 CO₂ 排放量计算与分析[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [14] 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.

作者简介:

张 涛 (1968-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 城市建设管理;

吴佳洁 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 项目管理;

乐 云 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 城市管理与建设工程管理, 复杂项目管理, 项目信息门户。