

文章编号:1000-582X(2011)03-116-05

水泥生产能源消耗内含碳排放量分析

刘 猛^{1a,1b}, 李百战^{1a,1b}, 姚润明²

(1. 重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 雷丁大学 建筑管理工程系, 英国, 雷丁 RG6 6AW)

摘 要: 基于生命周期理论, 根据能源内含阶段的能源消耗碳排放情况, 提出能源消耗碳排放内含系数量化能源内含阶段碳排放, 结合中国现有统计年鉴数据, 计算得到 2005—2007 年部分能源消耗碳排放内含系数, 煤炭和石油产品为 1.04~1.08, 天然气和火电约为 1.4 和 3.1。通过对中国 3 种水泥产品生产过程的能耗分析, 熟料烧成和煤炭消耗分别为过程和能源种类碳排放大户, 从水泥生产碳排放量看, PI525 和 PO425 水泥比 PS325 水泥高 50% 和 35%, 通过计算, 3 种水泥产品生产二氧化碳排放量为 295.4~445.6 kg/t 水泥。

关键词: 生命周期; 能源; 节能; 碳排放; 水泥

中图分类号: TK018

文献标志码: A

Embodied carbon emission from energy consumption in the production of selected cement products

LIU Meng^{1a,1b}, LI Bai-zhan^{1a,1b}, YAO Run-ming²

(1a. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering; 1b. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Department of Construction Management and Engineering, University of Reading, Reading RG6 6AW, UK)

Abstract: Based on life cycle theory and the energy consumption status of energy embodied phase, embodied carbon emission coefficient is proposed to quantify embodied carbon emission of energy carriers. With the data of China's statistical yearbook and relevant references, embodied carbon emission coefficients of selected energy carriers in 2005—2007 are obtained. For coal and oil products, the coefficients are 1.04~1.08. And 1.4 and 3.1 are for natural gas and thermal power, respectively. Analyzing the energy consumption of selected cement products, clinker production and coal consumption are the main carbon emission sources in terms of phases and energy carriers, respectively. From the analysis of the carbon emission in cement production, it is found that the emission amount of PI525 and PO425 are about 50% and 35% higher than that of PS325. And with the calculation, the CO₂ emission amount is about 295.4~445.6 kg/t for the selected cement products.

Key words: life cycle; energy; energy efficient; carbon emission; cement

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家“十一五”科技支撑重大项目课题(2006BAJ01A13); 国家自然科学基金重点项目(50838009)

作者简介: 刘猛(1979-), 男, 重庆大学城环学院副教授, 博士, 主要从事建筑环境, 建筑生命周期, 以及低碳建筑技术等方面的研究, (E-mail)liumeng2033@126.com。

随着全球气候变暖问题的日益突出,碳排放问题成为了各行各业关注的焦点,建筑作为能源消耗的大户,造成了大量的二氧化碳排放,建筑成为了节能减排的重点行业^[1-6]。近年来,生命周期理论不断深入,各国学者逐渐用全生命周期的视野来分析开发建筑节能减排技术^[7-13]。在建筑的生命周期中,运行阶段的能源消耗以及相应的碳排放是最多的,但随着运行阶段各种节能技术的采用,建筑材料生产阶段,也就是内含阶段的能源消耗和碳排放量比重将会逐渐增加^[14-15]。现有研究针对建筑材料的能源消耗集中在直接消耗,而没有考虑间接消耗^[5,8-10,12,16],这样不能完全反映建筑材料行业能源结构调整带来的减排效果。水泥作为建筑工程中的最重要的建筑材料之一,自1824年发明硅酸盐水泥以来,已成为工程建设中用量最大的胶凝材料,在建筑业中有着不可替代的作用^[16]。本研究考虑直接碳排放和间接碳排放,提出能源消耗碳排放内含系数量化各能源内含阶段的碳排放,根据3种标号水泥产品的生产过程清单数据分析水泥生产过程中碳排放情况。

1 能源消耗碳排放内含系数

1.1 计算方法

从生命周期的视角分析,能源消耗的碳排放包括能源碳排放和内含碳排放,能源碳排放是指能源本身的碳排放,采用IPCC提供的碳排放系数进行计算,部分能源碳排放系数见表1^[17]。

表1 部分能源碳排放系数

能源种类	碳排放系数	能源种类	碳排放系数
原煤	0.560	柴油	0.832
洗精煤	0.680	焦炉煤气	0.217
焦炭	0.830	汽油	0.861
原油	0.920	煤油	0.814
天然气	0.611	燃料油	0.845

说明:天然气碳排放量为 kg/m^3 ,其余能源碳排放量为 kg/kg

除了能源碳排放外,能源进入建筑之前,要经过开采、加工和输送等阶段,这些阶段称之为能源的内含阶段^[18-19]。内含阶段能源消耗碳排放还存在迭代排放,内含阶段碳排放为内含碳排放,笔者提出能源消耗碳排放内含系数量化内含阶段碳排放。

定义能源消耗碳排放内含系数

$$\beta = (C_e + C_{em})/C_e, \quad (1)$$

式中: β 为能源消耗内含碳排放系数; C_e 为能源碳排放系数, kg/kg 或 kg/m^3 或 $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; C_{em} 为能源内含碳排放系数, kg/kg 或 kg/m^3 或 $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

完全消耗系数矩阵可由里昂列夫逆矩阵计算得到^[19-20],根据式(2)可确定各能源消耗碳排放内含系数

$$\beta \cdot C_e T = (I - D) - 1 \cdot C_e T, \quad (2)$$

式中: D 为直接消耗系数矩阵; I 为单位矩阵; C_e 为能源碳排放系数矩阵, kg/kg 或 kg/m^3 或 $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $C_e = [C_{e1} \ C_{e2} \ \dots \ C_{en}]$; β 为能源消耗内含碳排放系数矩阵,

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \beta_n \end{bmatrix}.$$

1.2 数据来源

中国的商品能源种类主要有原煤、洗精煤、油品、天然气、电力等数十种^[21],如果针对每种能源产品进行详细的生命周期清单分析,需要了解每种产品的产量和对应的生产加工运输能耗,需要了解每种能源详细的生产工艺和数据清单,而这通常是较难的。考虑到数据的可获得性和完整性,结合《中国能源统计年鉴》中的统计条目,对能源种类进行合并处理,便于进行数据分析。例如,洗煤产品中有:洗精煤、其他洗煤、型煤等,均根据发热量折算成洗精煤,见表2。各种代表能源生产、加工过程能源消耗相关数据来源见表3。

表2 能源种类分类^[21]

代表能源	所含能源
原煤	原煤、热力、其他能源
洗精煤	洗精煤、其他洗煤、型煤
焦炭	焦炭、焦炉煤气、其他煤气、其他焦化产品
原油	原油
柴油	汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品
天然气	天然气
火电	火电
非火电	水电、核电

表 3 代表能源生产、加工过程能源消耗数据来源^[21]

代表能源	数据来源
原煤	中国能源年鉴中的“煤炭开采和洗选业”、“中国能源平衡表——洗选煤”和“一次能源生产量”
洗精煤	“中国能源平衡表——洗选煤”
焦炭	“中国能源平衡表——炼焦”
原油	石油和天然气开采业”
柴油	“中国能源平衡表——炼油”
天然气	石油和天然气开采业”
火电	“中国能源平衡表——火力发电”
非火电	“一次能源生产量”

能源的运输距离和运输方式是影响运输阶段能耗的主要因素。运输距离有长有短,运输方式有:航空,海路,内陆水路,铁路,公路和管道等^[22]。有些能源运输方式单一,如天然气基本以管道运输,但大部分能源运输方式多样,但受一个国家或地区的交通运输基础设施和运输经济性的制约,在一个特定时期、特定区域,某种能源的运输方式结构基本稳定^[20]。

煤炭运输中主要为铁路运输,其次为水运和公路运输等,油品的运输中主要为铁路、水运、公路和管道运输,天然气主要为管道运输。原煤、洗精煤、焦炭、原油和柴油的运输距离近似采用中国统计年鉴中(以下简称“年鉴”)“运输与邮电——按货类分国家铁路货物运输量”确定,其中,原煤和洗精煤采用“煤”的货运运输量,焦炭采用“焦炭”的货运运输量,原油和柴油采用“石油”的货运运输量。天然气输送距离以“西气东输”的干管总长度 4 000 km 为计算依据。各种运输方式比例,目前没有相关统计年鉴数据,暂采用参考文献中的数据^[20, 23]。

中国铁路的牵引动力有 3 种,内燃机车、电力机车和蒸汽机车,能耗较大的蒸汽机车正在迅速减少,内燃机车和电力机车不断增加^[24]。因此,2005 年后铁路货运运输可以忽略蒸汽机车,各种牵引动力使用比例近似采用各种机车数量之比,由年鉴中“铁路

机车拥有量”确定。机车的能源消耗可根据年鉴中“铁路运输技术经济主要指标”确定^[24]。

水路运输有海轮和内陆水路运输,海轮主要从事国际间的货运,假定能源运输均为内陆水路,能源消耗参考文献^[20],为每 1 万吨货物运输 1 km 消耗 81.4 kg 柴油。

公路运输能耗与货运汽车载货结构、能源结构、载货率和运输管理等因素有关。假定运输均为大宗货物运输,运输工具选用 20 t 载重卡车,能源为柴油。能耗标准为二级标准。柴油密度为 0.84 kg/L^[20]。

管道运输能耗参考文献,为 256.26 kJ/(t·km),能源构成为电力 42%,天然气为 58%^[20]。

电力输送损耗按年鉴中“电力平衡表”输送损耗与可供量确定,非火电不考虑输送损耗^[23]。

1.3 中国能源消耗碳排放内含系数

根据上述计算方法,以中国 2005—2007 年相关数据为主要依据进行计算^[21, 24-28],计算得到中国 2005—2007 年能源消耗碳排放内含系数如表 4。

表 4 中国 2005—2007 年能源消耗碳排放内含系数

能源种类	能源消耗碳排放内含系数			
	2005 年	2006 年	2007 年	平均值
原煤	1.032	1.029	1.030	1.030
洗精煤	1.051	1.048	1.043	1.047
焦炭	1.029	1.028	1.028	1.028
原油	1.078	1.073	1.073	1.075
天然气	1.454	1.372	1.321	1.382
柴油	1.046	1.045	1.041	1.044
非火电	0	0	0	0
火电	3.134	3.102	3.039	3.092

2 水泥生产能源消耗碳排放

水泥作为建筑物中用量较大的建筑材料,其内含过程中的能源消耗碳排放不能被忽视。硅酸盐水泥的生命周期如图 1 所示^[29]。

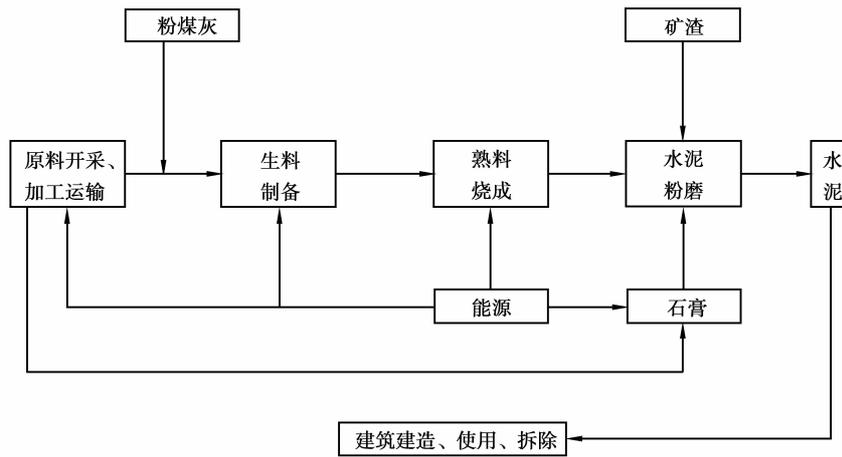


图1 水泥生命周期

典型水泥产品生产能源消耗如表5,水泥生产主要能源消耗是煤炭消耗和电力消耗,煤炭消耗折

算成洗精煤消耗,文献中数据未指明时间,假定为现有平均水平。

表5 水泥生产能源消耗实物量清单^[29]

	P. I. 52.5			P. O. 42.5			P. S. 32.5		
	洗精煤/ (kg · t ⁻¹)	柴油/ (kg · t ⁻¹)	电力/ (kW · h · t ⁻¹)	洗精煤/ (kg · t ⁻¹)	柴油/ (kg · t ⁻¹)	电力/ (kW · h · t ⁻¹)	洗精煤/ (kg · t ⁻¹)	柴油/ (kg · t ⁻¹)	电力/ (kW · h · t ⁻¹)
原料开采			27.810			24.270			17.21
原料运输		4.421	0.852		4.278	0.824		3.998	0.77
生料制备			34.370			30.000			21.27
煤粉制备			3.800			3.310			2.35
熟料烧成	119.42		27.140	104.22		23.680	73.9		16.79
熟料粉磨			38.170			33.310			23.62
矿渣粉磨						5.610			16.78
石膏制备			0.720			0.710			0.71
合计	119.42		132.010	104.22		120.900	73.9		98.73

生产原料的运输考虑运输重量、运输方式和运输距离,运输方式主要为铁路和水路,构成比为33.5%/66.5%,运输距离参考国家统计局年鉴中铁路运输的平均距离^[24,27-28]。取2005-2007年数据,生产原料运输过程能源消耗构成见表5。

结合能源消耗碳排放内含系数、能源碳排放系数,计算3种水泥产品的碳排放量,其中,电力按照2005-2007年火电和非火电比例分配。如图2所示。

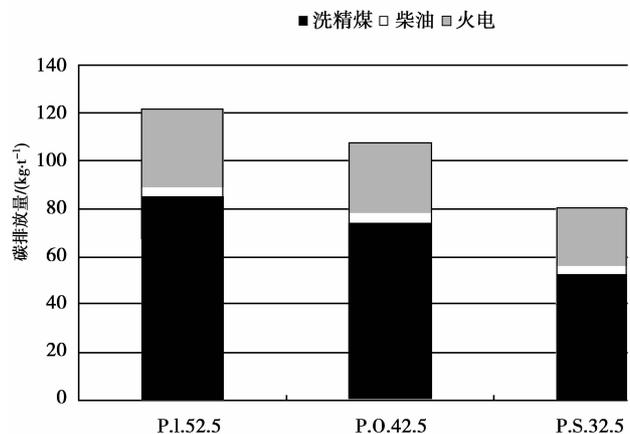


图2 3种水泥产品生产过程能源消耗内含碳排放

3 讨 论

1)从各能源消耗碳排放内含系数看,火电的内含过程消耗了两倍多于它自身能量值的能源,天然气消耗了近40%,其余能源在3%~8%,其余商品能源可近似采用各代表能源消耗碳排放内含系数;

2)水泥生产中碳排放主要是由于煤炭的使用,占70%~80%,火电占20%左右,而柴油不到5%;

3)从生产过程看,水泥生产中,熟料烧成成为主要环节,占碳排放量的80%左右,其余各环节绝不超过4%;

4)从3种不同标号的水泥总碳排放量看,每吨水泥的碳排放量约为80.6、107.8、121.6 kg,标号越高,碳排放越高,P. O. 42.5比P. S. 32.5高35%左右,P. I. 52.5比P. S. 32.5高50%左右。

4 结 语

提出了能源消耗碳排放内含系数来量化能源的生产、加工和运输过程能源消耗碳排放情况,通过对中国2005-2007年数据分析,能源内含阶段能源消耗碳排放为能源本身碳排放值的3%~8%,天然气和火电为40%左右和210%左右。通过应用到3种水泥产品的生产过程分析,熟料烧成和煤炭消耗分别为水泥生产中过程和能源种类的碳排放大户,均占80%左右,考虑氧化分数为100%,3种水泥的二氧化碳排放量为295.4~445.6 kg/t水泥。

参考文献:

- [1] PENNINGTON D W, POTTING J, FINNVEDEN G, et al. Life cycle assessment part 2: current impact assessment practice [J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 721-739.
- [2] GURRAN M A. Life-cycle assessment [J]. *Encyclopedia of Ecology*, 2008, 32(2): 2168-2174.
- [3] FINNVEDEN G, HAUSCHIND M Z, EKVAL T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1): 1-21.
- [4] PEIRO L T, LOMBARDI L, MENDEZ G V, et al. Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of the production of biodiesel from used cooking oil (UCO)[J]. *Energy*, 2010, 35(2): 889-893.
- [5] JOSA A, AGUADO A, CARDIM A, et al. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): 781-788.
- [6] LIU M, LI B, YAO R. Building operational energy consumption of Chongqing and its exergy assessment[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, 14(s3): 186-190.
- [7] THORMARK C. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(4): 429-435.
- [8] BURGESS G, FERNANDEZ-VELASCO J G. Materials, operational energy inputs, and net energy ratio for photobiological hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(9): 1225-1234.
- [9] YOHANIS Y G, NORTON B. Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK[J]. *Energy*, 2002, 27(1): 77-92.
- [10] WANG R, CAI Z. An ecological assessment of the vernacular architecture and of its embodied energy in Yunnan, China[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(5): 687-697.
- [11] CHEN T Y, BURNETT J, CHAU C K. Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong[J]. *Energy*, 2001, 26(4): 323-340.
- [12] SHUKLA A, TIWARI G N, SODHA M S. Embodied energy analysis of adobe house[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 755-761.
- [13] 王寿兵. 中国复杂产品生命周期评价方法研究[D]. 上海: 复旦大学, 2000.
- [14] VERBEECK G, HENS H. Life cycle inventory of buildings: a contribution analysis [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(4): 964-967.
- [15] VERBEECK G, HENS H. Life cycle inventory of buildings: a calculation method [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(4): 1037-1041.
- [16] 刘顺妮, 林宗寿, 张小伟. 硅酸盐水泥的生命周期评价方法初探[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(4): 328-332. LIU SHUN-NI, LIN ZONG-SHOU, ZHANG XIAO-WEI. Studies on the life circle assessment of Portland cement [J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(4): 328-332.
- [17] IPCC. Guideline of Greenhouse Gas Inventory for Nations[R]. Geneva: IPCC, 2006.
- [18] 刘猛. 建筑生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

- subject to a strip of surcharge[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(3): 615-636.
- [13] HARUYAMA M. Drained deformation-strength characteristics floose Shirasu (volcanic sandy soil) under three dimensional stresses [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(1):65-76.
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [15] 邵江. 开挖边坡的渐进性破坏分析及桩锚预加固措施研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- [16] 罗渝, 何思明. 高切坡超前支护锚杆受力机制研究[J]. 人民长江, 2009, 40(3):76-78.
LUO YU, HE SI-MING. Mechanics between pre-reinforced anchor bolt and rock mass in high cutting slope[J]. Yangtze River, 2009, 40(3):76-78.
- [17] 何思明, 李新坡, 王成华. 高切坡超前支护锚杆作用机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5):1050-1054.
HE SI-MING, LI XIN-PO, WANG CHENG-HUA. Mechanism of interaction between pre-reinforced anchor bolt and rock mass in high cutting slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5):1050-1054.
- [18] 何思明, 李新坡. 高切坡半隧道超前支护结构研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3827-3832.
HE SI-MING, LI XIN-PO. Study on pre-reinforced half tunnel structure in high cut slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3827-3832.
- [19] 何思明. 高切坡超前支护桩与坡体共同作用分析[J]. 山地学报, 2006, 24(5):574-579.
HE SI-MING. Interaction of pre-reinforced pile-soil of high cutting slope[J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(5): 574-579.
- [20] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- [21] 赵明阶, 何光春, 王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 120 页)

- [19] 刘猛, 姚润明. 建筑生命周期环境影响分析通用模型及应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3):114-118.  
LIU MENG, YAO RUN-MING. Generic model and application of environmental impacts exergy analysis for building life cycle[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3):114-118.
- [20] 黄志甲. 建筑物能量系统生命周期评价模型和案例研究[D]. 上海:同济大学, 2003.
- [21] 国家统计局工业交通统计司, 国家发改委能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2006.
- [22] 李夏苗, 谢如鹤. 论交通运输与能源的关系, 兼论交通运输的能源消耗与节能[J]. 综合运输, 1999, 21(10): 23-27.  
LI XIA-MIAO, XIE RU-HE. The relationship of transportation and energy consumption [J]. Comprehensive Transportation, 1999, 21(10): 23-27.
- [23] 李发智, 方淑芬. 东北地区成品油运输方式的探讨[J]. 油气储运, 1993, 17(6): 8-10.  
LI FA-ZHI, FANG SHU-FEN. Transportation means of oil products in Northeast area [J]. Storage and Transportation of Oil and Gas, 1993, 17(6): 8-10.
- [24] 国家统计局出版局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2006.
- [25] 国家统计局工业交通统计司, 国家发改委能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [26] 国家统计局工业交通统计司, 国家发改委能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008.
- [27] 国家统计局出版局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [28] 国家统计局出版局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008.
- [29] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的量化评价研究[D]. 北京:清华大学, 2004.

(编辑 郑洁)