

中国水泥生产环境负荷研究

朱天乐¹, 何炜¹, 曾小岚¹, 黄新², 马保国³

(1. 北京航空航天大学环境工程系, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学土木工程系, 北京 100083; 3. 武汉理工大学无机非金属材料工程系, 武汉 430070)

摘要: 基于生命周期理论, 采用 CML 环境影响评价方法对我国水泥生产的环境负荷进行了定量分析. 结果表明, 水泥生产的环境影响主要体现在温室效应、不可再生能源消耗和不可再生资源消耗, 其环境负荷分别占对应环境影响类型世界总负荷的 2.76%、2.34% 和 1.39%. 2004 年我国水泥生产的环境负荷约占世界总负荷的 1.28%, 其中, 立窑生产工艺、湿法回转窑生产工艺和新型干法生产工艺的环境负荷分别为 0.84%、0.12% 和 0.32%. 通过行业结构调整, 用新型干法生产工艺取代其它落后的生产工艺, 可使我国水泥生产的环境负荷降至世界总负荷的 1% 左右.

关键词: 水泥; 生命周期评价; 环境负荷

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)10-2135-04

Environment Load from China's Cement Production

ZHU Tian-le¹, HE Wei¹, ZENG Xiao-lan¹, HUANG Xin², MA Bao-guo³

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Department of Civil Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China; 3. Department of Inorganic Non-metal Material Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the life cycle theory, a quantitative evaluation of the environment load caused by cement manufacturing in China was carried out with the application of the CML environmental impact assessment method. The results show that global warming potential, energy depletion potential and abiotic depletion potential make the main contribution to the environment impact, their environmental loads corresponding to identical environmental impact sorts being 2.76%, 2.34% and 1.39% of the overall load of the whole world, respectively. In 2004, the environment load from cement manufacturing in China is roughly 1.28% of the overall load of the whole world, in which the environmental loads from the shaft kiln processing, wet rotary processing and new-type dry processing being 0.84%, 0.12% and 0.32%, respectively. And it can be reduced to about 1% by replacing backward production processes with the dry method production process.

Key words: cement; life cycle assessment; environment load

近 20a 来, 我国水泥产量一直位居全球第一, 而且增长迅速. 2004 年达到 9.7×10^8 t, 接近世界当年总产量的一半. 另一方面, 水泥生产工艺落后的问题仍然十分突出, 统计表明, 2004 年我国立窑工艺、湿法回转窑工艺和新型干法工艺生产的水泥产量所占比重分别为 59.4%、8.1% 和 32.5%, 新型干法工艺生产水泥产量不到总产量的 1/3^[1].

巨大的水泥生产规模和落后的生产工艺不仅加剧资源和能源紧张态势, 而且排放大量污染物. 按照目前的消耗水平推算, 35a 内已探明可供生产水泥的石灰石将耗竭^[2]. 就能源消耗而言, 统计表明, 2003 年全国水泥工业消耗能源 1.0×10^8 t 标准煤, 约占全国能源总耗量的 6%, 而同年度水泥工业总产值 (1.495×10^{11} 元) 仅占国内生产总值的 1.28%^[3]. 在水泥生产过程中, 排放的污染物包括废气、废水和噪声等, 以废气为主, 尤其是颗粒物, 2003 年排放量为 4.597×10^6 t, 约占全国工业系统

总排放量的 45%.

在水泥工业资源、能源消耗大, 同时产生大量污染物已得到充分认识的情况下, 改进生产工艺, 以降低水泥生产的环境负荷成为人们的共识. 然而, 到目前为止, 对于不同工艺生产水泥的环境负荷, 以及改进工艺可带来的环境效益尚缺乏全面的认识. 本文基于 ISO14040-14043 中介绍的生命周期评价理论^[4], 采用荷兰莱顿大学提出的 CML 环境影响评价方法^[5], 对 3 种典型水泥生产工艺, 即立窑工艺、湿法回转窑工艺和新型干法工艺生产单位产量水泥的环境影响进行评价. 并结合水泥产量分布, 确定我国水泥行业的总环境负荷. 最后, 分析通过行业结构调整, 降低水泥生产环境负荷的潜力.

收稿日期: 2005-11-07; 修订日期: 2005-12-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2002AA335050)

作者简介: 朱天乐(1963~), 男, 教授, 主要研究方向为大气污染控制理论与技术, E-mail: zhutl@buaa.edu.cn

1 典型水泥生产工艺环境负荷评价

1.1 目标和范围的确定

本研究以 1kg 42.5 等级硅酸盐水泥作为评价的功能单位,评价目标是确定不同工艺生产功能单位水泥的环境负荷.基于生命周期理论,评价范围界定为水泥产品的厂内生产过程及其周边环境.其中,厂内生产过程是指原料依次经过预处理、生料粉磨、煅烧、熟料磨和水泥均化等工序,最终成为水泥产品的生产全过程.水泥生产过程的周边环境是指外部资源和能源的投入和污染物的排放等.

1.2 原料、能源消耗和污染物排放清单

本研究以代表性水泥生产厂家的资源、能源消耗和污染物排放实测数据作为评价依据^[6~8].根据水泥生产工艺和污染物排放特点,考虑的原料组分包括石灰石、石膏、粘土和铁粉等.在干法生产工艺中,除这些组分外,还包括掺入粉煤灰和矿渣等工业废渣.能源消耗包括各生产工序的电耗和煤耗.污染物则包括颗粒物、SO₂、NO_x和CO₂等.文献[7]在比较不同水泥生产工艺的环境影响时,未考虑不可再生资源 and 颗粒物排放造成的环境影响,以及污染物对人体健康的影响^[9].实际上,不可再生资源消耗和颗粒物排放,以及污染物对人体健康的影响作为水泥生产的主要环境影响因素,对于水泥生产环境负荷的贡献不可忽视^[10,11].

根据上述评价范围和数据确定方法,可得到典型水泥生产工艺的资源、能源消耗和污染物排放数据如表 1 所示.

表 1 典型水泥生产工艺资源、能源消耗和污染物排放量/kg

过程	项目	立窑工艺	湿法工艺	干法工艺
水泥原料	石灰石	1.125 9	1.224 1	1.073 7
	粘土	0.166 5	0.199 0	—
	石膏	0.056 8	0.044 4	0.051 1
	铁粉	0.061 3	0.026 3	0.028 5
	粉煤灰	—	—	0.098 0
	矿渣	—	—	0.137 6
能源消耗	标准煤	0.195 3	0.194 0	0.093 8
	电力/kWh	0.083 0	0.111 2	0.096 6
污染物排放	颗粒物	3.25E-04	3.43E-04	2.55E-04
	二氧化硫	3.993E-04	9.033E-04	3.501E-04
	氮氧化物	2.4E-03	2.262E-03	1.419E-03
	二氧化碳	1.070 3	1.127 0	0.807 3

1.3 环境影响评价

环境影响评价的目的是对资源、能源消耗和污

染物排放进行定性和定量化描述,最终获得具有可比性的数据.本研究采用荷兰莱顿大学提出的 CML 环境影响评价方法,即把资源、能源消耗和污染物排放造成的影响分配给各环境影响类别;不同影响类别的相对重要性根据定性和定量相结合的方法确定;然后,采用层次分析法(AHP)确定不同影响类别的权重系数,继而计算出环境负荷^[12].

1.3.1 分类和特征描述

对于水泥生产来说,主要影响类别包括不可再生资源消耗(ADP)、不可再生能源消耗(EDP)、温室效应(GWP)、人类健康损害(HT)、环境酸化(AP)和营养化作用(NP)等 6 项.水泥生产原料石灰石、石膏、铁粉等的环境影响体现在不可再生资源消耗上,煤耗的环境影响则为不可再生能源;污染物的环境影响因种类不同而异.这些物质的影响类别和环境影响当量数如表 2 所示.

表 2 水泥生产的环境影响当量数¹⁾/kg·kg⁻¹

Table 2 Environment impact equivalents from cement manufacturing/kg·kg⁻¹

类别	ADF	EDP	GWP	AP	NP	HT	参考文献
石灰石	1.076 2	—	—	—	—	—	
石膏	3.014 1	—	—	—	—	—	
铁粉	3.128 3	—	—	—	—	—	
标准煤	—	29.308	—	—	—	—	
SO ₂	—	—	—	1.0	—	1.2	[13, 14]
NO _x	—	—	—	0.7	0.13	0.78	
CO ₂	—	—	1.0	—	—	—	
颗粒物	—	—	—	—	—	1.38	[15]

1) 环境影响当量数可理解为相对参照物的环境影响大小

表 2 中 EDP、GWP、AP、NP 和 HT 的参照物分别为 1kg 标准煤发热量,1kg CO₂、1kg SO₂、1kg PO₄³⁻和 1kg 人体重量.不可再生资源(石灰石、石膏和铁粉)消耗则由 Jeroen 等提出的公式,即式(1)和(2)确定^[16],其中,参考资源为原油,开采量和储量数据取自统计值^[17].

$$ADP = ADF \times m \tag{1}$$

$$ADF = \frac{DR}{R^2} \times \frac{R_{ref}^2}{DR_{ref}} \tag{2}$$

式中,ADF 为资源环境负荷因子;*m* 为功能单位产品相应资源的消耗量(见表 2,单位为 kg);DR 为相应资源的年开采量(kg);*R* 为相应资源的矿产储量(kg);DR_{ref}为参考资源的年开采量(kg);*R*_{ref}为参考资源的矿产储量(kg).

1.3.2 标准化

为了比较不同环境影响类别的作用程度,必须

将各环境影响类别转化为同一标准下的量化数据,可用各环境影响类别的环境负荷当量数与世界环境负荷的总当量数(表 3)之比值表示,称之为环境污染相对指数,如表 4 所示.

表 3 环境负荷总当量数¹⁾/kg·a⁻¹

Table 3 Total environment load equivalents/kg·a⁻¹

环境影响类别	参照物	世界环境负荷总当量数
ADP	1kg 原油	1.06×10^{14}
EDP	1J	$2.35 \times 10^{11} \text{GJ} \cdot \text{a}^{-1}$
GWP	1kg CO ₂	3.77×10^{13}
AP	1kg SO ₂	2.86×10^{11}
NP	1kg PO ₄ ³⁻	7.48×10^{10}
HT	1kg 人体	5.76×10^{11}

1) 环境负荷总当量数指全世界在 1a 时间内消耗的资源、能源总量和污染物排放总量

表 4 水泥工艺环境污染相对指数

Table 4 Relative index of environmental pollution of cement manufacturing

水泥生产工艺 环境影响类别	单位/a	立窑工艺	湿法工艺	干法工艺
ADP	10 ⁻¹⁴	1.49	1.47	1.32
EDP	10 ⁻¹⁴	2.80	2.90	1.59
GWP	10 ⁻¹⁴	3.05	3.27	2.38
AP	10 ⁻¹⁵	8.63	10.50	6.82
NP	10 ⁻¹⁵	4.91	4.92	3.32
HT	10 ⁻¹⁵	5.63	6.79	4.15

1.3.3 影响评价

经过标准化后的各种环境影响类别在量纲和参照标准上取得了一致,理论上已经可以进行相加求和,从而定量确定环境负荷.然而,由于各环境影响类别之间的重要性存在差异,因此还需获得各环境影响类别的相对权重.本研究采用层次分析法来完成这一任务,其原理是根据实验数据和专家意见确定各环境影响类别的相对重要性(表 5),继而得出权重系数(表 6).

利用表 6 环境影响类别的权重系数,对环境负荷相对指数进行加权求和,可得出立窑工艺、湿法回转窑工艺和干法工艺水泥生产的环境负荷分别是 $1.45 \times 10^{-14} \text{a}$ 、 $1.55 \times 10^{-14} \text{a}$ 和 $1.03 \times 10^{-14} \text{a}$,即 3

种典型工艺生产功能单位水泥所造成的环境负荷占全世界每年总环境负荷的比值分别为 1.45×10^{-14} 、 1.55×10^{-14} 和 1.03×10^{-14} .

表 5 水泥生产的环境影响类别重要性标度

Table 5 Importance scale of environment impact of cement manufacturing

环境影响类别	HT	ADP	EDP	GWP	AP	NP
HT	1	3	3	5	7	9
ADP	1/3	1	1	3	5	7
EDP	1/3	1	1	3	5	7
GWP	1/5	1/3	1/3	1	3	5
AP	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3
NP	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1

表 6 环境影响类别的权重系数

Table 6 Weigh of environment impact sorts

环境影响类别	HT	ADP	EDP	GWP	AP	NP
权重系数	0.424	0.204	0.204	0.094	0.048	0.026

2 我国水泥生产环境负荷

2.1 现阶段我国水泥生产环境负荷

根据上述典型水泥生产工艺的环境污染相对指数(表 4)、生产功能单位水泥造成的环境负荷和水泥产量,可得到我国现阶段典型工艺水泥生产所造成的环境负荷占世界总环境负荷的比例,如表 7 所示.

表 7 2004 年我国分工艺水泥生产环境负荷

Table 7 Environmental load from different production processes in China (2004)

生产工艺	产量 $\times 10^8$ /t	占全国总产量比例/%	占世界总环境负荷比例/%
立窑工艺	5.76	59.4	0.84
湿法工艺	0.79	8.1	0.12
干法工艺	3.15	32.5	0.32

也可得出不同环境影响类别和全行业环境负荷占世界对应环境影响类别和总环境负荷的比例,如表 8 所示.

表 8 表明,2004 年我国水泥生产 ADP、EDP、

表 8 2004 年我国水泥生产总环境负荷

Table 8 Environment load from cement manufacturing in China (2004)

环境影响类别	ADP	EDP	GWP	AP	NP	HT	全行业
占世界对应影响类别或总环境负荷的比例/%	1.39	2.34	2.76	0.78	0.43	0.51	1.28

GWP、AP、NP 和 HT 环境负荷分别占世界对应环境影响类别总环境负荷的 1.39%、2.34%、2.76%、

0.78%、0.43% 和 0.51%,GWP、EDP 和 ADP 对环境的影响最大,控制水泥生产造成的 CO₂ 排放,以

及资源和能源消耗应该作为我国水泥工艺改进的主要目标. 从表 8 还可看出, 我国水泥行业的环境负荷约占世界总环境负荷的 1.28%.

2.2 降低我国水泥工业环境负荷潜力分析

从表 4 不难看出, 干法工艺水泥生产的环境影响远低于立窑工艺和湿法工艺. 考虑到现阶段先进的干法工艺产量在我国水泥总产量中所占比重还较低, 仅为 32.5%. 因此通过行业结构调整, 用干法工艺替代其他工艺, 是降低我国水泥生产环境负荷的有效途径. 假定 2004 年我国水泥皆采用干法工艺生产, 类比计算表明, 可使全行业环境负荷降为 1% 左右, 比现行行业结构模式的环境负荷降低 22.5%.

3 结论

(1) 2004 年我国立窑工艺、湿法工艺和新型干法工艺生产功能单位水泥的环境负荷占世界总环境负荷的比值分别是 1.45×10^{-14} 、 1.55×10^{-14} 和 1.03×10^{-14} .

(2) 我国水泥生产的环境负荷主要因温室气体排放、不可再生能源消耗和不可再生资源消耗引起, 分别占对应环境影响类别世界总环境负荷的 2.76%、2.34% 和 1.39%.

(3) 2004 年我国水泥行业的环境负荷占世界总环境负荷的 1.28%, 其中, 立窑工艺、湿法工艺和新型干法工艺分别为 0.84%、0.12% 和 0.32%. 若以新型干法工艺替代其它工艺, 则可使我国水泥生产造成的环境负荷占世界总环境负荷的比值降至 1% 左右.

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2004 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2005-02-28.
- [2] 王定才. 探索循环经济理论让水泥混凝土业走向可持续发展[N]. 中国建材报, 2003-06-03.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴(2004)[M]. 北京: 中国统计出版

社, 2004.

- [4] Rebitzer G, Kekvall T, Frischknecht R, *et al.* Life cycle assessment Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. *Environmental International*, 2004, **30**(5): 701~ 720.
- [5] Heijungs R, Guinée J B, Huppes G, *et al.* Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide (Part 1) and Backgrounds (Part 2), prepared by CML, TNO and B & G. Leiden, 1992.
- [6] 龚志起, 张智慧. 水泥生命周期中物化状况的研究[J]. *土木工程学报*, 2004, **37**(5): 86~ 91.
- [7] 刘顺妮. 水泥-混凝土体系环境影响评价及其应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 1998.
- [8] 国家环境保护总局科技标准司. 水泥工业大气污染排放标准编制说明[R]. 北京: 2003.
- [9] 狄向华. 材料环境协调性评价的标准流程方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2001.
- [10] Josa A, Aguado A, Heino A, *et al.* Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, **34**(8): 1313~ 1320.
- [11] Schuhmacher M, Domingo J L, Garreta J. Pollutants emitted by a cement plant: health risks for the population living in the neighborhood [J]. *Environmental Research*, 2004, **95**(2): 196~ 206.
- [12] Ong S K, Koh T H, Nee A Y. Addressing the environmental impact of materials processing techniques using an analytical hierarchy process method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **113**(1~ 3): 424~ 431.
- [13] Gurrán M A. Environmental Life Cycle Assessment [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1996.
- [14] Van den Berg N W, Dutilh C E. LCA: A DETCH Guide to Environmental Life Cycle Assessment [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1996.
- [15] 常桂秋, 潘小川, 谢学琴, 等. 北京市大气污染与城区居民死亡率关系的时间序列分析[J]. *卫生研究*, 2003, **32**(6): 565 ~ 568.
- [16] Jeroen B, Guinée, Heijungs R. A Proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life cycle assessment [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, **14**(5): 917~ 925.
- [17] <http://www.chinamining.com.cn/resource/index.asp>