

特约专栏

水泥 LCA 研究与应用进展

崔素萍, 李琛

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 以水泥材料及其生产过程为研究对象, 开展水泥生产过程生命周期分析 (CLCA) 理论与技术应用研究, 解决水泥生产全过程资源、能源消耗与综合利用、废物排放等环境负荷定量分析的难题, 突破系统分析软件等实用技术, 建立了水泥材料生命周期基础数据库和异构数据集成应用技术, 开发出水泥生命周期分析和水泥基材料生态设计系统软件工具, 实现了水泥生产流程环境负荷辨识改进、低环境负荷的硅酸盐-硫铝酸盐-辅助胶凝材料复合体系水泥基灌浆材料设计与应用。

关键词: 水泥; 生命周期评价; 环境负荷; 制备工艺

中图分类号: TU37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)08-0035-07

Research and Application of Cement Life Cycle Assessment

CUI Suping, LI Chen

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Taking cement and its manufacturing process as the object, the research on cement life cycle assessment (CLCA) theory and technology practical application has been done, and it could resolve the environmental load measurement problems concerning consumptions of resources and energy, pollutions and emissions in the whole cement manufacturing process. Practical applications of the system analysis software as well as the CLCA basic database and data integrated sets were implemented also. The development of CLCA tools and cementitious materials eco-design system software could realize improvement on environmental load recognition in cement manufacturing, and design and applications of low environmental load Portland-aluminosulphate cement-supplementary gel materials complex system of cementitious grouting materials at the same time.

Key words: cement; life cycle assessment; environmental load; manufacture

1 前言

生命周期评价 (Life Cycle Assessment/LCA) 的理论与技术方法^[1], 是国际通用的评价产品及其生产过程环境影响的标准化方法, 所有与产品生产和消费有关的活动, 都从 LCA 中得到环境负荷信息。水泥生产过程的生命周期评价是对水泥从摇篮到坟墓全生命周期评价中的一个重要阶段, 即从原料开采到产品出厂的生产过程, 进行定量环境负荷分析, 指导生产过程的节能减排改进。

2 水泥生命周期分析理论与技术体系

2.1 水泥生产工艺及 LCA 评价程序

水泥生产过程主要包括生料制备、熟料煅烧和水泥

粉磨三个工序, 水泥生产过程对环境的负影响主要是天然资源、能源消耗和污染物排放。基于生命周期分析方法技术框架, 确定水泥生产过程生命周期分析按图 1 程序进行。

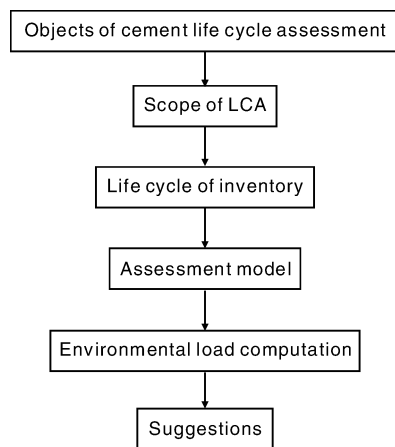


图 1 水泥生产过程环境负荷分析程序

Fig. 1 The analysis environmental load of cement manufacturing

收稿日期: 2011-04-18

通信作者: 崔素萍, 女, 1964 年生, 教授, 博士生导师

2.1.1 目标与范围界定

研究目标：生产过程环境热点的辨识、工艺改进及其效果分析。

功能单位：以 1kg 42.5 普通硅酸盐水泥所具有的使用性能作为功能单位。

研究范围：水泥生产过程环境负荷评价的系统边界确定为包括生料制备(包括原料开采和运输在内)、熟料煅烧(包括能源生产和运输在内)、水泥粉磨等主要工序。

数据质量：采集数据来自水泥企业实际生产，保证准确、一致和可再现性。

2.1.2 清单分析

结合水泥生产过程特点，确定水泥生产生命周期环境负荷评价所需的基础数据包括石灰石等原料消耗、煤、电等能量消耗和废气排放、废渣综合利用等。

2.1.3 影响评价

影响类型、类型参数和特征化模型的确定：根据水泥生产特点，选择不可再生资源消耗、温室效应、环境酸化、人体健康损害、光化学烟雾等影响类型。见表 1 所示。

特征化：采用 CML 方法作为水泥 LCA 分析的基础评价方法，但对于其中的资源耗竭特征化模型需要进行本土化修正。

化石燃料的耗竭应被定义为能源储量的损耗，本土化修正后的化石能源耗竭特征化因子：

$$ADP_{i,eng} = \frac{Dr_{i,eng} \cdot \varepsilon / (R_{i,eng} \cdot \varepsilon)^2}{Dr_{ref}/R_{ref}^2}$$

式中， $ADP_{i,eng}$ 表示化石能源*i*的特征化因子； $Dr_{i,eng}$ 表示化石能源*i*的年开采量； $R_{i,eng}$ 表示化石能源*i*的储量； ε 表示化石能源的折标准煤系数； Dr_{ref} 和 R_{ref} 分别表示参考资源的年开采量和储量。化石燃料的采储量及资源耗竭特征化因子的计算结果列于表 2。原煤、石油和天然气的折标准煤系数分别为：0.7143 kgce/kg，1.428 6 kgce/kg 和 1.330 0 kgce/kg。与水泥有关的非金属矿产资源的耗竭特征化因子^[2]的计算结果列于表 3。

表 1 水泥生产环境类型和类型参数
Table 1 The environmental categories and items for cement manufacturing

Environmental categories	Environmental items	Units
Abiotic Depletion Potential (ADP)	Coal, Limestone, Shale	Sb eq.
Global Warming Potential (GWP)	CO ₂	CO ₂ eq.
Acid Potential (AP)	SO ₂ , NO _x , HCl, HF	SO ₂ eq.
Human toxicity potential (HTP)	SO ₂ , NO _x , PM, HF	1,4-Dichlorobenzene eq.
Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	SO ₂ , NO _x , CO	Ethylene eq.

表 2 化石燃料的资源耗竭特征化因子
Table 2 ADP characterization factors for fossil fuel

Fuel	Yield per year	Reserves	Characterization factors kg Sb eq. /kgce	Relative kg Sb eq.
Coal	1.96E+09 t	1.03E+12 t	7.97E-08	5.86E+07
Oil	1.75E+08 t	6.17E+09 t	9.91E-05	8.74E+08
Gas	4.08E+10 m ³	3.26E+12 m ³	8.89E-08	3.85E+08

表 3 与水泥有关的非金属矿产资源的耗竭特征化因子
Table 3 Characterization factors for the depletion of nonmetals

Items	Sb eq. /t	Reserves/t	Characterization factors kg Sb eq. /kgce	Relative kg Sb eq.
Gypsum	2.13E+07	5.88E+10	1.90E-07	1.12E+07
Limestone	4.45E+08	6.59E+10	3.16E-06	2.08E+08
Tuff	2.21E+05	7.63E+07	1.17E-03	8.93E+07
Clay	6.10E+06	2.23E+09	3.78E-05	8.43E+07
Sandstone	3.47E+06	8.89E+07	1.35E-02	1.20E+09
Sand	2.99E+05	1.00E+08	9.21E-04	9.21E+07

2.1.4 评价结果解释

评价结果解释是根据目的和范围要求对清单分析结果进行归纳形成结论和建议。

2.2 多工序的环境负荷累积模型与评价方法

水泥生产过程的环境行为可表示为: $EP = f(E_r, E_e, E_g, E_l, E_s)$, 式中: EP 表示环境行为, E 表示环境因子, 下标 r, e, g, l, s 分别表示资源、能源、废气、废水、固体废弃物。

水泥生产工艺包括多个连续的工序过程。根据输入/输出分析方法(I/O), 建立了原材料消耗(R_n)、能源消耗(E_n)和废弃物排放(W_n , 包括废气、废水和固体废弃物)3类环境因子累积模型:

$$\begin{aligned} R_n &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^m c_{g,i,n} R_{g,i,n} + \sum_{j=1}^l \gamma_{rj} r_{j,n} \\ E_n &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{g=1}^m c_{g,i,n} E_{g,i,n} + \sum_{j=1}^l \gamma_{ej}^{in} E_{j,n}^{in} - \sum_{g=1}^k \gamma_{eg}^{out} e_{g,n}^{out} \\ W_n &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{g=1}^m c_{g,i,n} W_{g,i,n} + \sum_{g=1}^l \gamma_{wg} w_{g,n} - \sum_{r=1}^k \gamma_{wr} w_{r,n} \end{aligned}$$

水泥生产 LCA 评价的主要目的之一, 是比较不同产品或不同工艺间的环境行为。为了表达产品或工艺的 EP 值比率, 提出了综合相对环境指数 $IREI$ (Integrated Relative Environmental Index):

$$IREI = \sum_{i=1}^5 \omega_i \frac{E_{1,i}}{E_{2,i}}, \sum \omega_i = 1$$

式中: ω_i 为环境因子的权重系数; E 表示环境因子, $i = 1, 2, \dots, 5$ 分别表示资源、能源、废气、废水、固体废弃物; 下标 1、2 表示进行比较的 2 个生产工艺或工序产品, 选择其一作为参照标准。

该方法可以将水泥生产工序和产品或生产流程中将各影响因素进行归类比较, 解决了不同工序之间环境负荷的分配难题以及产品或工艺过程环境负荷定量评价的难题。

2.3 水泥生产环境负荷分析的标准化流程对照法与中国水泥工业清洁生产评价体系

针对水泥 LCA 中功能单位的确定与转换、数据处理以及评价结果解释等难题, 提出了水泥生产生命周期分析的标准化流程对照法, 采用计算工艺改进潜力指数, 应用于辨识环境改善最佳方案。

水泥生产标准化流程对照法: 将水泥实际生产过程 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 的各项环境负荷值与其标准化流程 $Sm = (sm_1, sm_2, \dots, sm_n)$ 中相应的指标进行定量分析与比较。 eBi 和 eSi 分别为实际工艺 B 和标准流程 S 的第 i 分项环境负荷, 其比值 (eBi/eSi) 表征了实际工艺向标准流程接近的相对容易程度。利用排列图法, 作出帕累托曲线, 可以直观表示出各环境负荷项影响排序,

得到其对生产过程整体环境协调性的相对影响程度, 从而区分出主要改进目标、次要改进目标及一般性目标。

建立了水泥工业清洁生产 LCA 技术评价的技术路线和工作程序, 通过集成上述水泥生产标准化流程对照法和资源耗竭特征化模型, 构建了包括资源消耗、能源消耗、污染物排放、产品品质、管理水平 5 项一级指标, 40 项二级指标的水泥工业清洁生产评价体系^[3-4]。提出了汇集专家评价、指数法和模糊关系矩阵的综合评价法, 将定量评价与定性分析有机结合, 建立了对实际生产过程进行评审的对比依据清洁生产评价基准值。以此为基础, 制定形成了《水泥行业清洁生产评价指标体系(试行)》(国家发改委 2007 年发布)、国家标准《水泥工业清洁生产技术要求》、建材行业标准《水泥工业清洁生产评价指标体系》。

3 水泥等基础材料生命周期分析数据库平台

LCA 从原料提取、制造、运输、销售、使用、再利用与维护、及其废物循环到最终处置, 涉及产品全生命周期各环节的资源输入、能源消耗、环境排放等数据, 并将环境排放等实物量转换为环境影响类别(温室效应、酸化效应、生态毒性、资源耗竭等)进行计算, 需要大量基础数据支持。通过解决工艺、应用、环境等领域大量异构数据集成应用技术难题, 建成了水泥等基础材料环境协调性评价数据库平台, 集成中国典型材料环境负荷数据十余万条^[5-7]。

3.1 水泥等基础材料生命周期分析基础数据库

建立了水泥生产资源能源消耗及污染物排放流程清单、行业平均水平及标准数据、数据采集表等。数据库为基于 Windows Advance Server 和 MS SQL Server 企业版、面向互联网的平台, 主要包括初级能源清单、电力清单、能源产品清单、交通运输清单等公用系统基础清单数据, 建筑材料、钢铁材料、高分子材料、有色金属材料环境负荷清单等典型材料环境负荷数据集, 提供国内环境标准及指标体系数据信息的环境排放标准数据, 包括本地化物质环境负荷数据的特征化因子、损害评价类型、标准化因子和权重因子在内的材料生命周期分析方法数据库。

3.2 具有访问、查询与分析功能的水泥等基础材料环境负荷数据集成技术

针对水泥生产生命周期分析所面临的海量数据的处理、不同结构数据的集成等技术难题, 建立了技术领域与环境领域的集成数据模型、提出了生命周期清单分析计算的物质流分配方法、设计了面向多层次应用的网络

数据库,开发了具有数据采集、信息检索基本功能和工序间的能量流分析、能量流时间序列分析和节能减排潜力分析等扩展功能的水泥生产环境负荷网络数据库。设计环境负荷数据查询系统以 Microsoft SQL 2008 为后台数据库服务器,采用 ASP.NET 技术开发数据查询,用户在访问许可授权模式下,通过 Web 浏览器与数据库进行安全联接,从数据库中查询相关核心数据。开发出具有企业信息、物料消耗和能量消耗等流程清单、排放数据的检索与分析,以及在线数据采集等功能的建筑材料生命周期清单网络数据库,应用于企业的物料和能量消耗、污染物排放、资源能源利用效率、综合环境负荷分析与管理,用于企业进行节能减排潜力分析和节能减排改进效果评价,以及行业管理。

4 水泥生命周期分析系统及典型生产流程环境负荷分析改进

4.1 水泥等基础材料生命周期分析系统

针对不同材料进行 LCA 分析和材料设计的应用系统,集成了适合各类材料、产品和服务的生命周期分析系统,该系统集成了材料环境协调性评价中心数据的本地化数据、本地化 LCA 分析方法和中文界面。系统分为 3 大功能模块:LCA 实例、基础数据、系统管理;

LCA 实例包括功能单元、流程建模、平衡计算和评估分析 4 个子模块;基础数据包括单位、物质流、形态和方法体系 4 个子模块。

生命周期分析系统通过对用户录入的物质流数据,按特定的形态将其展示在各个功能单元中,系统采取流程模型的方式把相关的功能单元组织在一起,实现以图形界面的方式显示物质流的输入输出过程,并记录下所有输入输出流的数量关系及换算系数,最后,对每个流程模型进行平衡计算和估计分析,输出有价值的信息,为实施工程提供可靠的决策参考依据。

4.2 典型水泥生产流程环境负荷辨识与节能减排改进

4.2.1 水泥生产流程综合环境负荷分析

以北京琉璃河水泥厂新型干法水泥生产系统为例,进行生产流程综合环境负荷分析。琉璃河水泥厂的主要产品是普通硅酸盐水泥,计算中确定 1 kg 42.5 普通硅酸盐水泥所具有的性能为 1 个功能单位。研究范围包括原料开采、原料预均化、生料粉磨、生料均化、熟料煅烧、煤粉制备、水泥粉磨 7 个主要生产工序,并且考虑了与水泥生产相关的原料开采、电力生产和煤炭生产过程产生的环境负荷。研究数据包括技术改造前的 2004 年和改造后的 2006 ~ 2007 年。单位水泥产品生产过程中的环境负荷特征化结果见表 4。

表 4 2004 年单位水泥生产的环境负荷表

Table 4 Environmental load of cement manufacturing in 2004

Environmental categories	Exploration	Prehomo-genisation	Grinding	Homo-genisation	Incineration	Pulverized coal preparation	Cement grinding
ADP	4.54E-02	1.20E-04	2.11E-03	8.99E-05	1.81E+00	8.18E-04	2.55E-02
GWP	8.65E-02	1.32E-03	2.27E-02	9.65E-04	6.80E-01	8.79E-03	4.62E-02
AP	9.48E-04	6.60E-06	1.14E-04	4.86E-06	1.13E-03	4.42E-05	2.33E-04
HT	1.07E-03	1.17E-05	2.05E-04	9.22E-06	9.79E-04	1.38E-04	1.92E-02
POCP	1.26E-05	1.38E-07	2.38E-06	1.01E-07	2.62E-05	9.23E-07	4.86E-06

4.2.2 环境负荷重点工序辨识及改造方案建议

熟料煅烧工序环境负荷最大,其环境负荷主要表现在不可再生资源消耗、温室效应、酸化效应方面。造成熟料煅烧阶段环境负荷严重的主要原因是,矿物原燃料的使用和煅烧过程的热量损失。其次是原材料开采工序,其环境负荷主要表现为温室效应和不可再生资源消耗,这是由于该工序主要消耗电能,而电能的生产需要燃煤,因此环境负荷的表现形式主要为煤炭资源消耗和燃煤排放 CO₂ 所造成的温室效应。该工序环境负荷产生的主要原因是矿山开采能耗。

提出如下节能改造方案建议:①利用工业废渣替代天然矿石,减少天然矿石原料的用量,从而降低原料开采工序和熟料煅烧工序对不可再生资源消耗和温室效应

的环境影响;②提高系统热效率,减少热损失所导致的燃料消耗带来的不可再生资源消耗和温室效应的环境影响;提高余热利用效率(利用余热烘干原燃料、采用余热发电技术等);③改进矿山开采技术、采用生料和水泥节能粉磨工艺,降低生产过程电力消耗。

4.2.3 技术改造方案实施案例

通过对钢渣组成、结构和性能的系统分析,确定了钢渣用于水泥生料技术的最佳粉磨工艺为钢渣与其它原料分磨后混的工艺,适宜的熟料配料方案为 KH = 0.91 ~ 0.93, n = 2.4 ~ 2.6, p = 1.3 ~ 1.5。在 2007 年钢渣的利用量突破 8 026 t,远远超过研究初期 2005 年的 5 000 t。

通过运用现场热工标定结合计算机对窑系统反求工

程计算，得到系统的分离效率、分解量分布、燃烧量分布等结果，从系统工程的角度对琉璃河水泥厂 2 500 t/d 熟料生产线的预热器、分解炉和冷却机各个单元系统及其相互间的影响进行了详细研究。通过对琉璃河水泥厂 TSD 预分解窑系统进行反求计算和分析得知，各级旋风筒进口风速相对较高，出口风速很低，系统的预热器尤其是一级筒的分离效率不够理想，系统飞灰量大，出预热器废气温度过高，这是系统烧成热耗偏高的重要原因，也是影响了系统热效率发挥和能耗降低的主要问题。

为了优化系统，在操作方面采取了：①合理分配窑内通风和三次风的比例。两者的分配是通过入分解炉三次风闸板开度来进行；②进行篦冷机的合理操作。当篦床上料层较厚时，应加快篦床运行速度，开大高压风机

的风门，使进入冷却机的高温熟料始终处于松动状态。并适当关小中压风机的风门，以减少冷却机的废气量；③窑头煤与窑尾煤的比例。实践证明，根据不同的产量和不同的物料成分窑炉用煤比例，一般为 (40 ~ 45) % : (60 ~ 55) % 较为理想。

在对水泥生产流程综合环境负荷分析基础上，针对琉璃河水泥厂窑头窑尾废气热量损失较大的问题，对系统实施了余热发电改造，在琉璃河水泥厂 2 500 t/d 水泥窑生产线上，建成一条装机 6 MW 发电机组的低温余热发电系统，并实现了成功运行。

计算出技术改造后单位功能水泥生产的环境负荷清单、技术改造后水泥生产过程的环境负荷影响，如表 5 所示。

表 5 技术改造后 2007 年水泥生产过程的环境负荷
Table 5 Environmental load of cement manufacturing in 2007 after technology improvement

Environmental categories	Exploration	Prehomo-genisation	Grinding	Homo-genisation	Incineration	pulverized coal preparation
ADP	2. 14E - 03	7. 64E - 06	1. 53E - 04	7. 18E - 06	1. 77E + 00	9. 80E - 03
GWP	1. 07E - 01	9. 15E - 04	1. 83E - 02	8. 60E - 04	2. 80E - 01	4. 88E - 02
AP	4. 84E - 04	1. 73E - 06	3. 47E - 05	1. 63E - 06	5. 29E - 04	9. 25E - 05
HT	6. 75E - 04	2. 42E - 06	4. 85E - 05	2. 27E - 06	2. 40E - 04	1. 38E - 04
POCP	1. 50E - 05	8. 53E - 08	1. 71E - 06	8. 00E - 08	2. 60E - 05	4. 55E - 06

4.3 指导水泥窑处置废物技术研究与应用

对处理废弃物、部分代替水泥原燃料等不同情况的环境负荷进行了生命周期评价比较，水泥生产的总体环境负荷依次为：不烧废弃物的最高、焚烧废弃物次之，而替代燃料和替代原料的总体环境负荷较前两种有所降低。指导了利用水泥窑焚烧处置废弃物技术开发，实现了年处理危险废物 10 000 t/a、处置城市污泥 16 万 t/a 的目标。

采用前述标准流程对照法、生命周期综合环境负荷分析系统，分析北京地区 and 我国典型水泥企业生产环境负荷状况，比较了不同规模、不同生产工艺水泥生产的环境负荷；结合物质流分析方法，解析北京地区水泥生产与应用的环境负荷状况，分析全国水泥行业环境负荷，应用于水泥行业环境负荷评价与节能减排改进。分析结果表明，全国水泥平均能耗与最低能耗之间相差近 30 kgce/t 水泥，按照 2010 年水泥产量 18.7 亿 t 计算，如果将所有水泥生产的综合能耗降至最低，可实现 5 600 万 t 标煤/a 的节能量；采用各种减排技术每年可减排 CO₂ 量 1 亿 t 以上。

5 水泥基材料生态化设计软件开发与应用

基于生态设计思想、采用全生命周期评价技术方

法，对水泥基材料综合性能(使用性能、环境性能和成本)进行设计。计算硅酸盐水泥熟料、硫铝酸盐水泥熟料单位功能环境负荷，根据工程使用要求，从生产成本和潜在环境影响的定量化评估出发，设计成本低、环境影响小、使用性能好的复合体系水泥基胶凝材料组成配比，以多相多组分复合实现低环境负荷。

5.1 综合价值指标判据与复合体系水泥生态设计软件

提出了以性能/环境负荷比值作为水泥环境性能优劣的判据，其判别依据为由成本、性能和环境影响三者形成的综合价值指标：P/IC，其中 P (Performance) 为性能、C (Cost) 为成本，I (Impact) 为环境影响，综合价值指标的意义在于用较小的成本、较低的环境负荷获得尽可能高的效能。在此基础上，针对水泥基胶凝材料多元复合的特点，建立了复合体系生态化设计理论，采用生命周期方法的指标体系 (CML、ECO-Indicator) 数据和相关计算模型，结合我国水泥生产的实际情况与性能、环境影响和成本综合考虑，开发出了“复合水泥生态设计软件”。图 2 所示为复合水泥综合价值评估流程。

5.2 设计研制了硅酸盐 - 硫铝酸盐复合体系水泥基灌浆材料

采用前述计算的中国本土特征化因子，计算出硅酸盐水泥熟料、硫铝酸盐水泥熟料、矿渣、粉煤灰的环境

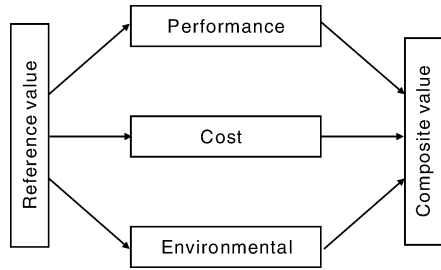


图 2 复合水泥综合价值评估

Fig. 2 The comprehensive valuation for composite cement

影响值和不同组成复合体系水泥基材料的环境影响值。计算了复合体系水泥的性能与环境影响比值, 分析比较单位环境影响使用性能, 给出复合体系水泥基材料的综合价值指标 P/IC, 依照生态设计综合价值指标最大化原则确定优化的配比。图 3 为设计流程。

设计的硅酸盐-硫铝酸盐复合体系水泥基材料(优选配比为硅酸盐水泥熟料: 硫铝酸盐水泥熟料: 矿渣: 粉煤灰: 石膏 = 40 : 5 : 40 : 10 : 5 和 40 : 5 : 30 : 20 : 5 的

复合水泥), 单位环境负荷的使用性能比硅酸盐水泥提高 10 倍以上(表 6)。

复合体系水泥新产品应用于北京地铁 4 号、10 号线和京广铁路等工程, 解决了国家重点工程难题, 成功实现了不同水泥体系间性能的互补和优势叠加效果, 同时保证了低环境负荷。

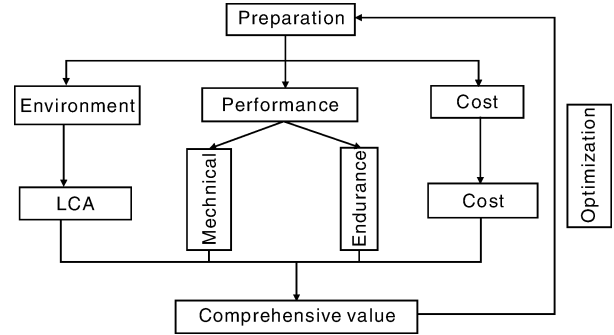


图 3 复合水泥设计流程

Fig. 3 The flow of designing composite cement

表 6 复合水泥的综合性能测试结果

Table 6 The testing results of comprehensive performance for composite cement

NO.	Composition/%					28-day Compressive strength/MPa	Environmental load	Performance index	Comprehensive value
	P. O Cement	Sulpho-aluminate cement	Slag	Flyash	Gyp				
1	50	5	32	8	5	48.3	3.59E-15	4.251	4.51
1'	55	0	32	8		42.1	3.52E-15	3.854	4.30
2	50	5	24	16	5	47.9	3.59E-15	4.346	4.63
2'	55	0	24	16	5	41.6	3.52E-15	4.257	4.77
3	40	5	40	10	5	45.9	1.57E-15	11.112	11.87
3'	45	0	40	10	5	42.6	1.50E-15	9.963	11.21
4	40	5	30	20	5	44.4	1.56E-15	9.520	10.24
4'	45	0	30	20	5	41.7	1.49E-15	9.745	11.04
5	85	0	5	5	5	46.5	9.30E-15	1.205	1.29
5'	95	0	0	0	5	48.7	1.16E-14	1.00	1.00

6 结 语

水泥对资源、能源的依赖和对环境的污染, 使其长期位居节能减排重点行业。我国水泥工业经历了索取资源的经验型、高效节能的集约型发展阶段, 开始进入以环境友好为特征的生态型发展阶段。以基于热力学的水泥热工理论为指导, 解决了资源、能源有效利用的评价问题, 实现了水泥生产由经验型向集约型的转变。生态型阶段以环境友好为特征, 涉及产品、流程、工序、设备等多层次的资源和能源消耗、环境污染、生产管理与质量控制等多个因素, 需要建立水泥生产综合环境负荷定量分析和评价的新理论和新方法, 指导水泥工业向生

态型发展。生命周期评价方法, 不仅可以定量计算出资源、能源等单项环境负荷变化情况, 还可以从大系统的角度定量计算出包括资源、能源消耗与污染排放在内的综合环境负荷变化结果, 避免了孤立研究资源、能源及污染排放的弊病, 能够科学地系统地指导生产过程节能减排综合改造, 引领水泥产业升级和行业技术进步^[8-10]。

参考文献 References

- [1] Goran Finnveden, Tomas Ekvall, Jeroen Guinee, et al. Recent Developments in Life Cycle Assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 21(1): 1-17.

- [2] Gao Feng, Nie Zuoren, Wang Zhihong, *et al.* Characterization and Normalization Factors of Abiotic Resource Depletion for Life Cycle Impact Assessment in China[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009(1): 13–17.
- [3] Cui Suping(崔素萍), Hao Qingjun(郝庆军). 水泥工业清洁生产评价指标体系权重的研究[J]. *Cement Guide for New Epoch*(新世纪水泥导报), 2007(2): 9–12.
- [4] Cui Suping(崔素萍), Li Chen(李琛). 水泥工业节能法规影响的模型分析[J]. *China Cement*(中国水泥), 2009(4): 52–53.
- [5] Gong Xianzheng, Nie Zuoren, Wang Zhihong. Constructing Basic Database Framework of Mlca in China[J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2004, 14 (Suppl 3): 313–315.
- [6] Liu Yu, Nie Zuoren. Development of Chinese Characterization Factors for Land Use in Life Cycle Impact Assessment[J]. *Science China*, 2010, 53(6): 1483–1488.
- [7] Gao Feng(高峰). 生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008: 2–45.
- [8] Cui Siping(崔素萍). *Material Recycling and Environment Impact Assessment of Cyclic Society*(循环性社会材料循环与环境影响评价)[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [9] Nie Zuoren(聂祚仁). 生态环境材料的研究与发展趋势(上)[J]. *New Material Industry*(新材料产业), 2001(10): 12–15.
- [10] Nei Zuoren(聂祚仁). 生态环境材料的研究与发展趋势(下)[J]. *New Material Industry*(新材料产业), 2001(11): 22–32.

超硬材料及制品专业委员会在京成立

中国材料研究学会超硬材料及制品专业委员会在北京正式宣布成立。并同期举行了“中国超硬材料发展论坛暨第5届中国金刚石相关材料及应用学术研讨会”。参会代表达到160多人,成为“2011北京材料周”系列活动——中国材料研讨会上规模最大,人数最多的一个分会。黄伯云院士等参加了成立大会并发言。分会共计交流论文27篇,展出墙报17篇。

作为新材料之一的超硬材料,其广泛用于石油、地质、冶金、煤炭的勘探、开采、钎杆等钻头制造;机械加工用的镗、车、铣、刨、磨、钻等各种刀具和磨具以及耐磨器件拉丝模、量具等的制造。为我国机械、航天、军工、石油、地质、煤炭、矿山、石材、玻璃、陶瓷、五金、电子产业及能源开发、工程施工、先进制造业等提供了不可或缺的利器,具有重要作用和强大生命力。

我国超硬材料产业规模早在“九五”、“十五”期间就已经成为世界生产大国。“十一五”期间,我国超硬材料的创新亮点不断涌现。其中我国六面顶压机大型化进程迅速。中国的铰链式六面顶压机成为世界上静态超高压高温合成金刚石、CBN的生产设备主要制造国。铰链式六面顶压机是我国的独创发明。人造金刚石合成工艺也取得重大创新,由片状合成工艺全面改进成为粉末合成工艺。采用六面顶压机生产的金刚石复合片(PCD、PDC)、CBN复合片(PCBN)具有较强的优势,甚至国外也采用该设备及工艺生产金刚石复合片。

另一个亮点就是CVD金刚石薄膜生产工艺。目前世界发达国家CVD金刚石薄膜的生产方法主要有:热丝CVD法(HFCVD)、燃烧火焰沉积法(Flame Deposition)、直流电弧等离子喷射CVD法(DAPCVD)、微波等离子体CVD法(WMPCVD)、激光辅助CVD法(LACVD)等。我国金刚石膜(CVD)制备采用最多的是热丝法(HFCVD)。“十一五”期间,我国研制开发了直流等离子体喷射化学气相沉积法(DAPCVD),可用来制作高纯度金刚石大单晶,达到世界先进。并自主研发成功了“高功率直流等离子体喷射CVD设备”,使我国成为继美国之后,能独立设计、制造同类设备的国家。为金刚石在热、光、电、声等高新技术领域的应用奠定了基础,开辟了广阔前景。

我国超硬材料的成就引起欧美、日、韩超硬材料巨头们的高度重视。但不可忽视的是,虽然我国超硬材料产业率先迈入世界强国行列,实现了由大到强的跨越,但是我国的超硬材料制品生产尚处于中低端阶段,距世界强国的差距还很大。我国要成为品质强国,还有很长一段路要走。

我国超硬材料的开发和生产企业众多。中国材料研究学会超硬材料及制品专业委员会的成立,为进一步聚合行业力量,促进交叉行业间的技术交流,加速金刚石的功能应用的开发,推动我国超硬材料行业全面进入世界强国行列而不懈努力。借助“十二·五”期间国家将大力发展新材料产业的历史机遇,努力实现我国“超硬材料的强国梦”。

(本刊通讯员)