

特约专栏

中国材料生命周期评价数据模型及数据库开发

李小青, 龚先政, 聂祚仁, 王志宏

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 作为数据密集型方法, 高质量的数据是开展材料生命周期评价的重要前提, 数据的可靠性直接影响着材料生命周期评价结果的可信度和应用性能。建设符合国情的材料生命周期环境负荷基础数据库, 是我国开展 LCA (Life Cycle Assessment) 实践的基础数据保障和技术支撑。根据 ISO14040 系列国际标准, 关于 LCA 分析的基本框架, 从技术领域、环境领域和价值领域分析了 LCA 实践的数据要求和计算需求, 建立了各领域实体的数据模型及清单数据的计算模型, 完成了中国材料环境负荷数据库 (Sinocenter 2.0) 的总体框架设计和数据库详细设计, 并对数据库进行了兼容性分析; 进一步简要介绍了数据库的主要内容, 并在此基础上开展了水泥能耗分析、材料生态设计等应用软件开发, 以及面向互联网及大数据的 LCA 数据库的应用研究; 探讨了材料环境负荷数据库技术将来的主要研究内容和研究方向。

关键词: 环境负荷数据; 生命周期分析; 数据模型; 数据库设计

中图分类号: X828 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)03-0171-08

Data Model and Database Development for Materials Life Cycle Assessment in China

LI Xiaoqing, GONG Xianzheng, NIE Zuoren, WANG Zhihong

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

Abstract: As the data intensive method, high quality environmental burden data is an important premise of carrying out materials life cycle assessment, and the reliability of data directly influences the reliability of the life cycle assessment results and its application performance. Therefore, building Chinese LCA database is the basic data needs and technical supports for carrying out and improving LCA practice. Firstly, according to requirement of ISO14040 series standards, the data request and computation demand were studied from the scope of technique, environment and value fields, together with the detailed analysis and systemic abstract of LCA process, finally related models for LCA practice were developed. Based on the built models and the analysis of LCA database structure, functional assign and application demand, the general framework of Chinese LCA database named Sinocenter 2.0 had been accomplished, the detailed design of database was also achieved, the compatibility of Sinocenter 2.0 with the Ecoinvent database and ISO14048 standard was analyzed. Secondly, the main contents of the database were briefly introduced, and the application software of cement energy consumption analysis and materials ecodesign were developed. Then the applied researches orient to internet and big data technology were promoted. Finally, the future research works were proposed and discussed.

Key words: environmental loads data; life cycle assessment; data model; database design

1 前言

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是一种数据密集型方法, 需要大量不同层次、不同地区和不同 LCA 基础数据的支持。因此, 高质量的数据是开展材料 (产品) 生命周期评价的重要前提, 数据的可靠性直接影响着材料生命周期评价结果的可信度和应用性能^[1]。

从 LCA 方法学的角度, 数据质量方面的研究主要体现在对清单结果的不确定性分析和对清单数据的敏感性分析, 辨识出 LCA 模型中具有高不确定度和高敏感

收稿日期: 2015-09-24

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA03Z432, 2013AA031602); 国家 973 计划 (2007CB613206); 国家支撑计划 (2007BAE42B05, 2011BAJ04B06, 2011BAC04B06, 2011BAB02B04); 北京市重点基金 (2081001, 2141001); 国家自然科学基金 (51304009)

第一作者: 李小青, 女, 1983 年生, 助理研究员

通讯作者: 龚先政, 男, 1967 年生, 教授, Email: gongxianzheng@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.03.02

度的关键数据,从而指出控制和改进数据质量的关键点。另一方面,在信息技术领域,可以依靠数据库的完整性约束保证数据在描述现实对象时的一致性和正确性。因此,建立可靠的 LCA 数据库并开发相应的 LCA 软件是保证清单数据可靠性和质量的重要方法,很多国家、研究单位和企业都在致力于建立专业的 LCA 数据库。

由于不同国家和地区资源分布不平衡、科技水平层次不同以及能源消耗的不对称,材料(产品)在整个生命周期中对环境的影响存在很大的差异。国外 LCA 软件所依赖的基础数据库基本都是基于特定地区或国家的平均数据,并不适合我国的国情。因此,依据中国国情和地域特点,以及材料生命周期的特点,设计一个结构合理、效率较高、使用方便,且易扩展的中国材料生命周期评价基础数据库,将在很大程度上提高我国材料 LCA 应用系统的可靠性和可维护性,对我国 LCA 实践的推动意义重大。

2 国内外研究进展

作为保证数据质量的重要方法,许多国家和国际的公开数据库已经发布,比较著名并广泛应用的有瑞士 ECOINVENT 数据库、瑞典 SPINE@CPM 数据库、德国 Gabi 扩展数据库、美国 NREL-USLCI 数据库、澳大利亚 LCI 数据库和欧洲生命周期文献数据库 ELCD 等^[2-5]。

我国在 LCA 数据方面的工作起步于 20 世纪末期,在“九五”国家“863”计划的大力支持下,收集、整理了国内主要材料产业(钢铁、水泥、铝、工程塑料、建筑涂料和陶瓷等)的第一手环境负荷数据,并在北京工业大学建立了材料环境协调性评价基础数据库(SinoCenter)平台^[6-9]。在持续的“863”计划、“973”计划、国家支撑计划和北京自然科学基金的支持下,经过十几年的不懈努力和发 展,该数据库已具有较大的规模,积累材料生命周期分析基础数据近 12 万条,并在技术和商业上开展了具体的应用。此外,中国标准化研究院、四川大学^[10]以及上海环翼环境科技有限公司等开展了数据库方面的工作。目前国内专业 LCA 软件工具的开发和应用还不成熟,相关研究和实际应用中使用较多的是荷兰的 SimaPro 和德国的 Gabi。文献[11]和[12]分别通过案例对这两种软件的性能进行了比对。

对于 LCA 研究者和实践者,在实际应用中往往只能得到一部分数据,其他数据由于多种原因无法得到。对于 LCA 的数据缺失问题,文献[13]通过分析产品生产数据的数据结构,应用低秩矩阵的补全技术,提出一种生命周期分析和投入产出分析的非负矩阵补全模型,

并将该模型和相应的算法应用于 Econivent 数据库中,补全生命周期评价中的缺失数据。

3 材料生命周期评价数据模型及数据库设计

数据库设计是指对于一个给定的应用环境,构造最优的数据库模式,建立数据库使之能够有效地存储数据,满足各种用户的应用需求。数据模型是一种形式化描述数据、数据之间联系以及有关语义约束的方法,是数据库系统中用以提供信息表示和操作手段的形式框架。它包括能精确描述系统的静态结构、动态结构和完整性约束 3 部分。数据库按数据模型的特点分为层次数据库、关系数据库、网状数据库和面向对象的数据数据库几种。材料生命周期评价数据库通过应用当前理论最成熟、应用最广泛的关系型数据库技术,提出一套符合材料生命周期特点的数据库建设方法体系。

数据库的设计过程分为建立数据库概念模型和生成数据库物理模型两个阶段,前者将现实世界中的实体映射成数据库概念模型,后者再根据数据库概念模型生成具体 RDBMS 支持的数据库物理模型。依据数据库设计规范化理论的指导,数据库模型满足第三范式,从数据库设计的角度消除存储异常,减少数据冗余,保证数据操作的高效率。

3.1 材料生命周期评价数据模型分析

完成一个产品的全生命周期评价需要 3 方面的信息,即在不同空间和时间体系上的技术领域的信息、环境领域的信息和价值领域的信息。同时,还需要建立清单编制的计算模型和 LCI 数据的不确定性分析框架。

3.1.1 技术领域的数据库模型

(1) 过程与中间流

过程与中间流是 LCA 研究的核心概念与关键模型,LCA 系统可以抽象为过程,而过程的内容体现为流的交换,过程和中间流之间通过输入输出和所属关系相互关联,其概念模型如图 1 所示。

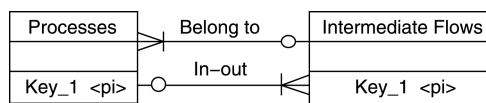


图 1 过程和中间流的概念模型

Fig. 1 The conceptual model of the process and intermediate flows

(2) 产品系统

图 2 给出了产品系统的概念模型。产品系统是通过物质和能量联系起来的,具有一种或多种特定功能的单元过程的集合。为了便于描述,将代表产品的实体记为

计划。为了说明产品系统的层次性,需进一步抽象出过程连接实体,用于描述过程所属的计划以及过程间产生联系的中间流,从而体现各个过程如何通过一定的关系组成层次结构。同一个产品系统的所有过程是相互联系在一起的,通过对所有过程连接实体进行追踪,就可以将产品系统的层次结构描述出来^[14]。

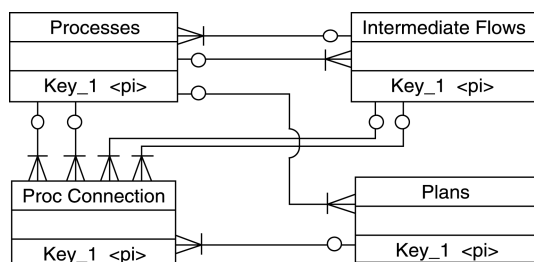


图2 产品系统的概念模型

Fig. 2 The conceptual model of the product system

在 LCA 实践中,首先对研究对象进行产品系统建模,然后根据模型进行基于过程的实际流的平衡计算,通常采用自上而下、自下而上或从选定基点开始两端同时计算,但每种方法都必须使整个产品系统的物质平衡保持稳定性和确定性。因此,所有的计算必须以唯一特定的中间流为参考基准,计算其他的物质流和能量流,才能保证整个系统的平衡特性,该参考中间流就是基准流。

(3) 分配

当某过程拥有多个产品的输出流时,则需考虑资源和排放物质在不同产品间的分配。无论根据经济价值或质量分配都必须提供具体比率,以决定资源和排放物在不同的产品中的数量比例。因此分配也是客观存在的一个实体。对于不同的体系,同样物质的分配关系有所不同,分配方法只依赖于所选取的系统。分配的数据模型如图3所示。

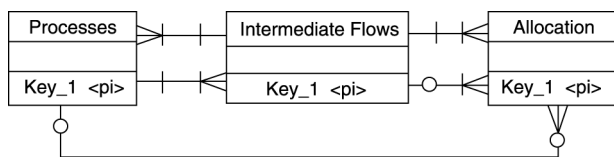


图3 分配的概念模型

Fig. 3 The conceptual model of allocations

(4) 基础流

基础流是组成客观世界的实体,不依赖于产品系统中数据中间流而存在,而是中间流的具体内容。基础流包括各种具体的物质,如材料、产品、能源形式、资源和排放等。为了便于在数据库中调用特定的基础流,需要对基础流进行分类,如基础流所属的分类是原材料、

排放物还是能源物质等,从而构成数据库中物质的命名系统。每一个基础流都有自己的详细信息,为避免数据冗余,抽象出流信息实体用来描述基础流的化学公式、数据收集地点、属性等信息。基础流的数据模型如图4所示。

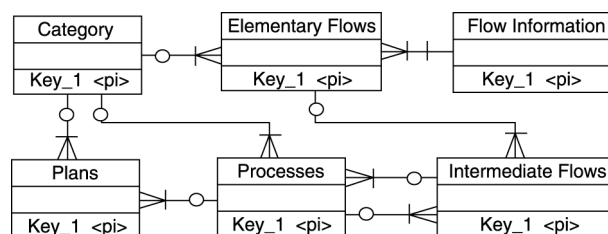


图4 基础流的概念模型

Fig. 4 The conceptual model of the basis flows

在技术领域,除了上述概念模型,单位以及管理信息相关实体也是数据库概念模型设计阶段的重要组成部分,其概念模型的分析与构建过程类似。

3.1.2 环境领域的数据库模型

LCA 中环境是指研究对象边界外的自然环境系统,通常表示一个较小空间区域。当研究对象的流穿越系统边界进入自然环境系统时,将产生潜在的环境影响,环境影响的性质则取决于环境的性质(如环境容量),影响效果则体现为环境的特定性质变化。因此,环境领域的数据库指人类活动发生的地理区间及其所影响的环境类型,其主要实体是地理信息和环境。地区和环境作为环境领域的实体,与技术领域的基础流和过程有直接联系。

LCA 方法将人类活动对环境的影响分为典型的几类,称为影响分类,通常包括资源耗竭、人类健康影响和生态影响3大类。根据不同的评价方法,每一大类下又包含有许多小类,如 ReCiPe 方法中生态影响下又包含有全球变暖、臭氧层破坏、酸雨和富营养化等。特征化用来衡量相同数量的不同基础流对同一相关影响分类的贡献大小。LCA 方法的数据模型如图5所示。

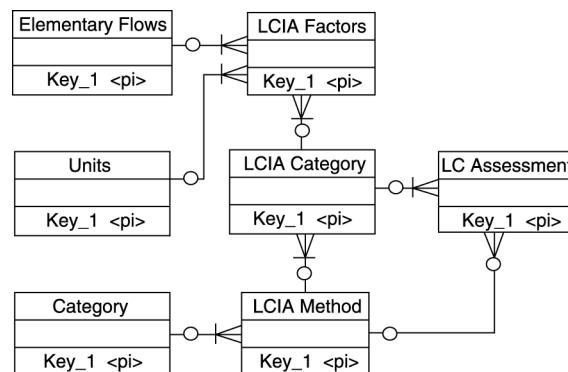


图5 LCA 方法的概念模型

Fig. 5 The conceptual model of LCA methods

3.1.3 价值领域的数据库

价值领域通常属于社会体系的范畴,是社会价值体系取向的一种表现。生命周期分析过程中,无论是在影响评价过程中的影响模型的建立,还是在标准化和权重分析时对影响类型的重要性判断,都依赖于执行者的个体经验,即执行者的社会价值取向。此外,价值体系还决定了 LCA 执行者如何从技术领域和环境领域选取所需要的数据。

3.1.4 清单编制的计算模型

对于材料的生命周期,一般包含多个相互联系的单元过程,而且每个单元过程存在大量的输入和输出,正确建立计算模型是开展清单分析的基础。清单分析方法基于不同的计算模型,具有多种计算与数据处理方式,主要有基于流程图的矩阵分析算法、基于输入—输出表的分析方法和混合清单分析方法,本研究采用当前清单编制最常用的矩阵法,具体计算模型见文献[15]。

3.1.5 LCI 数据的不确定性分析框架^[16]

不确定性分析用来判定与量化由于输入的不确定性和数据变动的累积给 LCI 结果带来的不确定性的系统化程序。我国目前 LCI 研究的数据来源主要为公开发表的统计资料,无从判定与量化输入的不确定性。因此,对于 LCI 数据的收集者来说,积累特定现场监测数据的统计信息,对不确定性分析有着重要作用。目前,大多根据文献中推荐的方法来估计常见数据类型的不确定性,主要方法有:利用高斯误差传递公式计算的误差传递算法;基于概率分布的随机模拟方法;基于区间表述的区间算法和基于模糊数学表述的模糊集算法等,其中随机模拟方法是应用最为广泛的方法,其基本分析框架见图 6。

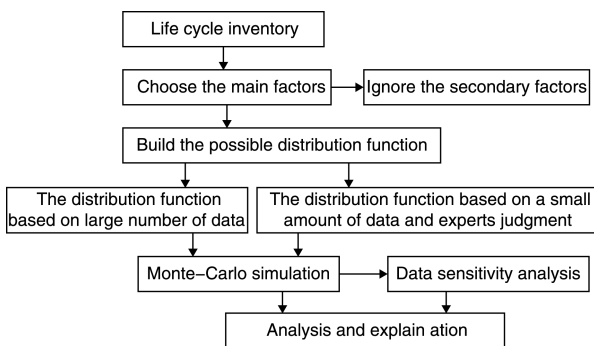


图 6 LCI 数据的不确定性分析框架

Fig. 6 The uncertainty analysis framework of LCI data

3.2 材料生命周期评价数据库的实现

3.2.1 数据库总体结构

生命周期评价数据库系统是一个复杂而庞大的应用系统,为了维护系统的完整性与一致性,必须对一些基

本的对象进行规范化,通常这些对象是数据库中的最基本的数据,如基础流、单位、地点和分类信息等。因此,数据库总体框架分为基本数据集、标准数据集和应用数据集 3 部分。基本数据集和标准数据集为应用数据集的建立提供基础数据和参考标准,从而保证数据的一致性和可追溯性,同时使数据库具有良好的兼容性、可扩展性和易维护性。数据库整体结构如图 7 所示。

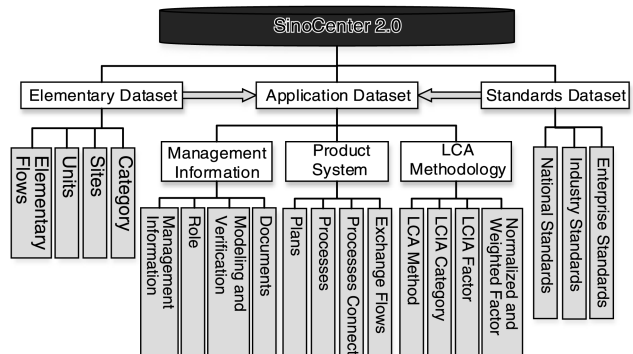


图 7 数据库总体结构

Fig. 7 The structure of database

基本数据集包括基础流、单位、地点和分类等实体,存放整个数据库体系中所用物质的相关信息数据、各种度量单位及相应换算关系、地理信息数据以及分类信息数据。

应用数据集包括管理信息库、产品系统库、评价方法库 3 部分。管理信息库主要存储项目相关的管理及建模验证等数据,以及 LCA 实践中各数据来源及其特性的描述,以增加数据透明性。产品系统库中存储 LCA 实践的核心数据,包括计划、过程和中间流等。LCA 方法数据库中存储评价方法及对应评价指标体系数据。

参考标准数据集主要存储国内相关企业、行业和国家环境标准及指标体系数据信息。

3.2.2 数据库平台的选择

数据库平台需要能够满足数据收集和查询等基于 Web 的网络操作需求。目前比较流行的关系网络数据库平台主要有 Oracle、MySQL、DB2 以及 SQL Server 等。Oracle 和 DB2 在大型的商业网络系统中有着广泛应用,对于多并发的大数据量事务处理应用,具有很高的稳定性和较快的响应速度,且具有跨平台的优点,但价格昂贵。MySQL 数据库系统可以运行在当前主流操作系统上,且代码开源,体积小、速度快,在许多中小型网站中得到广泛应用,但安全性较差。SQL Server 的优势在于与 Windows 操作系统具有良好的兼容性,已成为 Windows 平台下性能最佳的数据库,性价比较高,且可以扩展到 TB 级的数据库,能轻松处理千万级以下的数据

量。结合具体需求,本研究选择 SQL Server 2008 企业版作为建立 LCA 基础数据库的数据库管理系统平台。

3.2.3 数据库物理模型生成

数据库物理模型中各实体属性的建立主要参考 ISO14048 标准及国际主流 EcoSpold02 和 ILCD 数据格式,以保证和其他 LCA 数据库数据的兼容性。

基本数据集中各实体是最基本的引用数据,被过程、数据中间流以及评价方法所引用和参考。产品系统库是 LCA 数据库的核心,是进行材料(产品)全生命周期评价的直接数据。图 8 是根据概念模型建立起来的基于 SQL Server 2008 数据库管理系统的基本数据集和产品系统库的物理模型图。

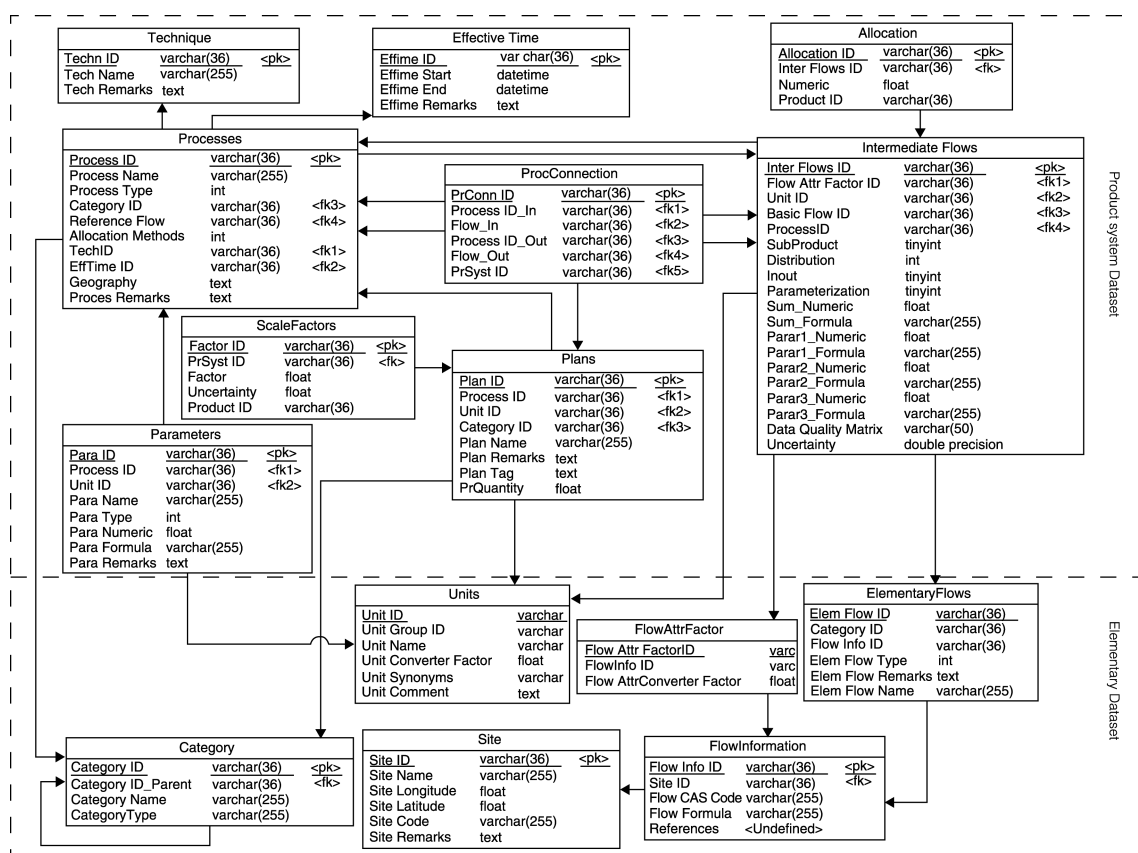


图 8 产品系统的物理数据模型

Fig. 8 The physical data model of the product system

管理信息库、评价方法库及标准数据集等数据库物理模型的建立方法类似。

3.2.4 数据库兼容性分析

国际上,对于 LCA 数据集的研究与开发,一般遵从 ISO14040 系列标准的要求,尤其是 ISO14048 环境负荷数据报告的格式,但在技术实现上存在较大的差异。目前,ecoinvent 数据库的 EcoSpold 以及 ELCD 数据库的 ILCD 格式得到了广泛的应用,绝大多数 LCA 软件工具和数据库都支持这两种格式的 LCA 数据交换。

为了实现 Sinocenter 2.0 数据库与其他 LCA 数据库之间的数据交换,材料 LCA 数据库 Sinocenter 2.0 中的数据格式设计时参考了 ISO14048 标准数据文件格式以及 ILCD 格式,和 ecoinvent 3.0 中使用的最新的 EcoSpold02 版数据格式,通过对详细数据字段的分析和比

对可以发现, Sinocenter 2.0 数据库与国际上当前主流的数据库具有良好的兼容性,可以完全兼容其主要数据,通过设计接口程序便可以实现不同数据库间数据的交换。

3.3 生态设计数据库

材料的生态设计是将环境因素纳入到材料设计过程之中,在材料生命周期的各个环节考虑其可能产生的环境负荷,通过改进设计将材料生命周期的环境影响降到最小程度。从生态设计角度来看,材料环境负荷数据还远不能满足材料生态设计的要求,还需要大量材料性能、工艺技术、事实规则、设备、使用等,全方位、多尺度的数据和分析工具等综合平台的支持。因此,在 Sinocenter 2.0 中扩展材料性能和经济成本数据集,为材料的生态设计提供相应的材料性能和成本方面的信息。

4 材料 LCA 数据库的主要内容及应用开发

4.1 单元过程清单数据的收集

对于材料(产品)的环境负荷数据,一般按照生产过程划分为单元过程,然后各单元过程按定义的功能单元,进行资源和能源输入和相应的输出及环境排放数据的收集和管理。数据源自于大量的调研数据、公开出版的各类统计年鉴和计算数据。在数据集的入库过程中,严格按照 ISO14040 系列要求进行数据的审核、分类与计算,并按照一定的功能单元进行数据的存储,主要信息为功能单元的定义、数据质量信息、环境负荷信息(资源消耗、能源消耗、空气排放、水体排放和固体废弃物)。对于公用领域的数据,如电力生产环境负荷数据、交通运输环境负荷数据,则定义为相对独立的环境负荷数据集,并重点说明数据集的数据质量信息。

4.2 主要数据集

目前,材料 LCA 数据库中涉及的基础数据近 12 万余条,内容涉及 68 类材料及过程清单,如电力产品清单^[17-19]、化石能源产品清单^[20-22]、交通运输清单^[23-24]、钢铁材料清单^[25-26]、建筑材料清单^[27-30]、有色金属编目清单^[31-34]、高分子材料清单^[35-37]、联接材料编目清单等^[38]。

评价方法库中选择性的分析了目前广泛使用的 LCA 评价方法的特点,主要包括 Eco-indicator 99、CML、IPCC 等评价体系,并重点对 CML、Eco-indicator 99 指标体系,进行了本地化研究,结合我国的资源特点,建立了 42 种金属矿产和 58 种非金属矿产的本地化资源损害因子、归一化因子。同时,基于我国土地资源状况,建立了不同土地使用与转换的土地资源损害因子和归一化因子。详细的环境负荷数据集种类及数据来源见表 1。

表 1 材料生命周期环境负荷数据集

Table 1 The datasets of material life cycle environmental load data

Materials	Datasources	Datasets number
1.Building materials	Cement 32 NSP and 5 Shaft kiln cement production enterprises	More than 90
	Glass 12 float glass production enterprises	More than 40
	Ceramics 4 sanitary wares and 24 construction tiles production enterprises	More than 60
	Wall 38 wall materials production enterprises	More than 40
2.Ferrous metals	Steel More than 70 steel production enterprises	More than 200
	Alloy Enterprises investigation and statistics	2
	Magnesium Enterprises investigation	1
	Aluminum Enterprises investigation	1
3.Nonferrous metals	Plumbum Enterprises investigation	1
	Zinc Enterprises investigation and statistics	1
	Cuprum Enterprises investigation and statistics	1
	Electricity Enterprises investigation and statistics	8
4.Energy	Fossil energy Enterprises investigation and statistics	10
	Road Enterprises investigation and statistics	10
5.Transportation	Railway Enterprises investigation and statistics	3
	Shipping Enterprises investigation and statistics	4
	CML Localization	1
6.LCA methods	EPS Localization	1
	Ecoindicator 99 Localization	1

此外,引进了国外著名 LCA 环境负荷数据库,如 Simapro、Umberto、Gabi、DEAM、IVAM 和 Ecoinvent,主要涉及日用品、造纸、钢铁、石化、有机(无机)料、能源、运输和电子产品等方面的环境负荷数据,它们也是材料 LCA 数据库的重要组成部分,为开展我国材料(产品的) LCA 比较研究提供了基础数据,特别是对 Ecoinvent 数据库关键内容进行了本地化的对比研

究与开发。

4.3 数据库应用软件开发

基于建立的材料环境负荷基础数据库,集成北京工业大学 LCA 研究团队的十多年来在模型、方法和指标体系方面的大量科研成果,如矿产资源耗竭特征化模型、土地使用环境影响特征化模型、材料生产流程能质的焓模型、材料生产多工序过程的物质流(资源、能源

和废弃物)的环境负荷累积模型,针对典型材料行业节能减排和生态设计的实际情况,开发了相应需求和应用的软件工具包,如《水泥产品生命周期能耗分析系统(2013SR038488)》、《材料生命周期能耗分析软件(2010SRBJ1357)》、《复合水泥生态生态设计软件(2007SRBJ2464)》等,帮助企业辨识产品生命周期中的能耗“热点”,从而找到改善产品生产阶段能效的有效途径,为企业开展节能减排与产品生态设计提供数据与方法支持,用于典型建材、镁等材料生产环境负荷评价与管理、节能减排技术方案优选,以及区域及行业布局调整等,企业应用节能减排效果明显。

4.4 面向互联网及大数据的应用开发

在面向互联网的应用开发方面,材料(产品)全生命周期环境负荷评价数据已成为“国家材料科学数据共享网”的节点之一:材料环境负荷数据共享资源节点。在该数据平台上,可实现基于材料种类、生产规模和时间范围等查询条件的分类查询,检索网址: <http://cnmlca.bjut.edu.cn>。该平台采用安全性较高的ASPX网站开发技术,用户通过Web注册与认证后,根据授权模式的差异,进行共享资源访问和授权资源访问。

此外,大数据在零售行业中已经发挥了举足轻重的作用,材料产业也是如此,不管是国家提出的中国制造2025,还是工业4.0,实现材料大国向材料强国的迈进,都需要分析和考虑如何在大数据环境下,实现传统业务模式的创新与重塑。鉴于以上需求,本课题组开发和部署了大数据环境下的材料环境负荷数据采集软件,正在研究开发基于大数据技术的中国材料生命周期数据管理平台,同时发展适合材料领域的新型数据挖掘方法。

5 结 语

中国生命周期清单数据库的建立和应用,为我国节能减排、碳排放(碳足迹)分析、清洁生产审计等提供了科学、基础数据支撑。同时,大数据在材料行业的运用与发展也面临一些困难,总体来讲,搜寻行业数据还比较困难,相关信息的自由流通还存在很大的阻碍,甚至相关信息的统计还有不准确的情况出现。

我国生态设计与生命周期评价数据库的发展方向主要包括以下3方面:首先是对数据采集、数据管理和数据质量保证等相关技术的进一步研究,为数据库更新与扩展提供技术保障;其次需要进一步研究数据库结构和数据的扩展方法,以支持动态生命周期评价;最后是在材料基因组理念的指导下,筛选并建立材料环境负荷基因组,研究材料的结构-性能-环境友好性之间潜在的深层次关系。

参考文献 References

- [1] Nie Z R. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2013, 18 (8): 1 435- 1439.
- [2] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. *The Ecoinvent Database* [EB/OL]. (2015-09). <http://www.ecoinvent.org/>
- [3] Industrial Environmental Informatics (IMI). *The SPINE @ CPM Database* [EB/OL]. (2015-09). <http://cpmdatabase.cpm.chalmer.se>
- [4] National Renewable Energy Laboratory (NREL). *The USA Life Cycle Inventory Database* [EB/OL]. (2015-09). <http://www.nrel.gov/leci>
- [5] European Commission-DG Joint Research Centre. *The European LCI Database* [EB/OL]. (2015-09). <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/>
- [6] Gong X Z, Nie Z R, WANG Z H, et al. *Rare Metals* [J], 2006, 25: 101-104.
- [7] Gong Xianzheng (龚先政), Zhang Qun (张群), Liu Yu (刘宇), et al. *Journal of Beijing University of Technology* (北京工业大学学报) [J], 2009, 35 (7): 997-1 001.
- [8] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Zhihong (王志宏). *Journal of WuHan University of Technology* (武汉理工大学学报) [J], 2004, 26 (3): 12-14.
- [9] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Zhihong (王志宏) et al. *Materials China* (中国材料进展) [J], 2011, 30 (8): 1-7.
- [10] Liu Xialu (刘夏璐), Wang Hongtao (王洪涛), Chen Jian (陈建) et al. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报) [J], 2010, 30 (10): 2 136-2 144.
- [11] Herrmann I T, Moltesen A. *Journal of Cleaner Production* [J], 2015, 86: 163-169.
- [12] Martinez E, Blanco J, Jimenez E, et al. *Renewable Energy* [J], 2015, 74: 237-246.
- [13] Xu Fangfang (徐芳芳). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (上海交通大学), 2014.
- [14] Sun Yanbin (孙艳彬). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Dalian: Dalian University of Technology (大连理工大学), 2013.
- [15] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Zhihong (王志宏) et al. *Journal of Beijing University of Technology* (北京工业大学学报) [J], 2009, 35 (12): 1685-1689.
- [16] Gong Xianzheng (龚先政). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2006.
- [17] Di Xianghua (狄向华). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2006.

- [18] Di Xianghua (狄向华), Nie Zuoren (聂祚仁), Zuo Tiejong (左铁镛). *China Environmental Science* (中国环境科学) [J], 2005, 25 (5): 632-635.
- [19] Di X H, Nie Z R, Yuan B R, *et al.* *The International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2007 (5): 331-336.
- [20] Yuan Baorong (袁宝荣). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2006.
- [21] Yuan Baorong (袁宝荣), Nie Zuoren (聂祚仁), Di Xianghua (狄向华), *et al.* *Modern Chemical Industry* (现代化工) [J], 2006 (4): 59-61.
- [22] Yuan Baorong (袁宝荣), Nie Zuoren (聂祚仁), Di Xianghua (狄向华) *et al.* *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展) [J], 2006, 25 (3): 334-336.
- [23] Ma Liping (马丽萍). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2007.
- [24] Zhang Yufeng (张宇峰), Gong Xianzheng (龚先政). *Science Technology and Industry* (科技和产业) [J], 2011, 11 (2): 64-67.
- [25] Zhou Hemin (周和敏). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2000.
- [26] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Zhihong (王志宏). *Research on Iron and Steel* (钢铁研究) [J], 2006 (4): 49-52.
- [27] Chen Wenjuan (陈文娟). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2007.
- [28] Li Xiaopeng (李晓鹏). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2009.
- [29] Luo Nan (罗楠). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2009.
- [30] Zhang Qun (张群). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2009.
- [31] Gao Feng (高峰). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2008.
- [32] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, *et al.* *The International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2009, 14: 480-489.
- [33] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, *et al.* *Science in China, Series E: Technological Sciences* [J], 2009, 52 (8): 2 161-2 166.
- [34] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2006, 18 (3): 749-754.
- [35] Chen Hong (陈红), Hao Weichang (郝维昌), Shi Feng (石凤) *et al.* *Acta Scientiae Ciecumstantiae* (环境科学学报) [J], 2004, 24 (3): 545-549.
- [36] Meng Xiance (孟宪策). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2010.
- [37] Li Yongjie (李永杰). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2007.
- [38] Wang Xiaoxia (王晓霞). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Beijing: Beijing University of Technology (北京工业大学), 2008.

(编辑 盖少飞)