

特约专栏

基于 MFA/LCA 的典型有色金属生产 环境负荷评价与优化

高峰, 阳丹品, 聂祚仁, 龚先政

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 有色金属生产、消费和循环利用是一个复杂的非线性系统, 与其相关的资源消耗及其产生的环境影响很难预测。近年来, 物质流分析和生命周期评价方法在有色金属行业循环经济和可持续发展研究领域发展迅速。它们作为量化的决策分析工具, 不仅能够为企业技术升级改造提供可行的建议和措施, 还能为行业宏观节能减排目标的实现程度提供评判依据。阐述了物质流分析和面向流程的生命周期评价方法的主要观点、理论基础、研究思路和框架, 以铝、镁、铜、铅、锌等为例, 对上述方法在典型有色金属生产中的应用进行了总结和分析, 并对其在有色金属工业节能减排中的进一步研究予以讨论和展望。

关键词: 有色金属; 环境负荷; 节能减排; 物质流分析; 生命周期评价

中图分类号: X758 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)03-0179-08

The Environment Load Evaluation and Optimization for the Typical Non-Ferrous Metals Production Based on the MFA/LCA Method

GAO Feng, YANG Danpin, NIE Zuoren, GONG Xianzheng

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

Abstract: The production, consumption and recycling of non-ferrous metals are a complicated nonlinear system. It is difficult to predict their related resources consumption and environmental impacts. In recent years, material flow analysis (MFA) and life cycle assessment (LCA) have been developed and applied in the non-ferrous metals industry for circular economy and sustainable development. These two quantitative decision analysis tools can provide not only feasible suggestions and measures for technology upgrades and renovation of enterprises, but also evaluation basis for non-ferrous metals industry to achieve the goal of energy saving and emissions reduction. The main ideas, theoretical basis, research ideas and frameworks of MFA and process-oriented LCA are elaborated in this paper. The application of these methods in typical non-ferrous metals production, such as aluminum, magnesium, copper, lead and zinc, is summarized and analyzed. Further researches of energy saving and emissions reduction in the non-ferrous metals industry are discussed and prospected.

Key words: non-ferrous metals; environmental load; energy saving and emissions reduction; material flow analysis; life cycle assessment

1 前言

有色金属是国民经济重要的基础原材料, 由于其产品种类多、应用领域广、产业关联度高, 在国民经济发展乃至国防工业建设等方面发挥着重要的作用。2000~2014 年我国 10 种常用有色金属产量增长了 4.6 倍, 年均递增

13.3%, 产量连续 12 年位居世界第一。其中, 铝、铜、铅、锌的产量占 10 种常用有色金属总产量的 95% 以上; 其他有色金属产量也呈现出快速增长的趋势(图 1)。从能耗方面来看, 2000~2014 年我国有色金属行业主要产品的单位能耗大幅下降(表 1), 一些主要指标如铝锭综合交流电耗已接近或达到世界先进水平。但由于产量的过快增长导致能耗总量居高不下。2012 年有色金属行业总能耗约 16 020 万吨标准煤(按发电煤耗值计算), 占全国能耗总量的 4.4%。其中, 电力消耗为 3 909 亿千瓦时, 占全国电力消费量的 7.9%, 其中, 电解铝生产电力消耗占有有色金属行业电力消耗的 71.6%, 占全国电力消耗的 5.6%。

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51304009)

第一作者: 高峰, 男, 1978 年生, 副教授, 硕士生导师, Email: gaofeng@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.03.03

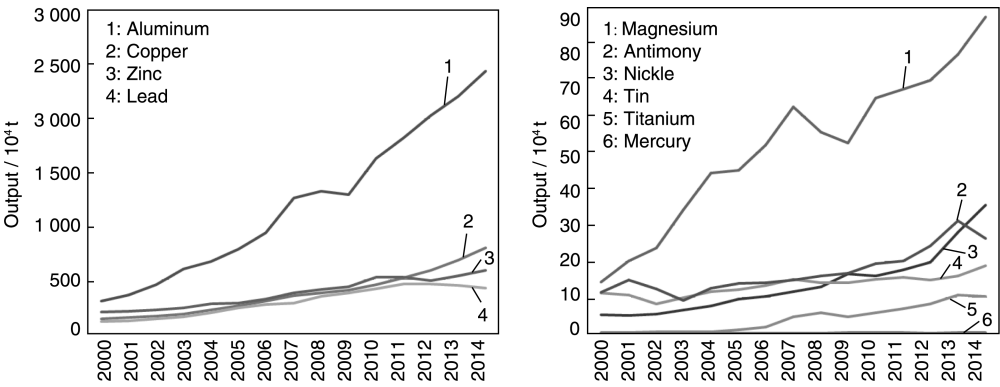


图 1 2000~2014 年 10 种常用有色金属产量

Fig. 1 The outputs of ten kinds of non-ferrous metals from 2000 to 2014

表 1 主要有色金属能耗指标

Table 1 Energy consumption indicators of main non-ferrous metals

Indicator	Unit	2000	2005	2010	2011	2012	2013
Overall energy consumption of copper smelting & refining	kgce/t	1 277.2	733.1	398.8	407.1	424.3	316.4
Specific overall energy consumption of alumina	kgce/t	1 212.4	998.2	590.6	573.7	542.8	527.8
A.C. Overall consumption of aluminum ingots	kWh/t	15 480	14 575	13 964	13 902	13 827	13 740
Specific overall energy consumption of aluminum ingots	kgce/t	1 986.0	1 870.0	1 791.6	1 783.6	1 774.0	1 762.8
Overall energy consumption of lead smelting	kgce/t	721.0	654.6	421.1	433.8	467.7	469.3
Overall energy consumption of electrolytic zinc	kgce/t	2 306.9	1 953.1	999.1	945.7	901.9	909.3
Overall energy consumption of magnesium smelting	kgce/t	12 184.4	9 165.9	5 453.6	5 159.8	4 959.8	4 859.8
Overall energy consumption of nickle smelting	kgce/t	5 581.7	4 056.1	3 594.8	3 527.6	3 274.2	—
Overall energy consumption of copper processing	kgce/t	1 106.8	719.9	243.6	254.3	222.7	—
Overall energy consumption of aluminum processing	kgce/t	1 139.5	746.2	390.8	372.5	342.8	—

根据 2013 年工业和信息化部发布的《关于有色金属工业节能减排的指导意见》，有色金属行业为实现“十二五”节能减排目标，提出了以重有色金属冶炼生产过程控制为重点，针对铅、镉、砷、汞等重金属污染物生产的关键环节，组织实施了清洁生产技术改造，推广了一批先进适用的节能减排技术，从源头消减了有毒有害物质的产生量，降低了末端治理的难度和压力。然而，矿产资源开采和冶炼生产过程长期累积的污染问题仍比较突出，有色金属行业面临的节能减排任务仍十分艰巨。从国内发展环境看，我国重大基础设施工程建

设、战略性新兴产业及国防科技工业的发展，为有色金属工业发展带来了更大的空间；同时，能源、资源和生态环境的制约因素也将日趋强化。有色金属行业过去十多年依靠资源密集、产量增长、劳动力成本和环保标准低等作为支撑的发展模式已经难以维持，迫切需要加快转变发展方式，加速实现转型升级。从国际环境看，金融危机之后的世界经济缓慢曲折复苏，围绕资源、市场、技术、标准等方面的竞争将更加激烈。应对全球气候变化，减少二氧化碳等温室气体排放的新形势，使有色金属工业发展的外部环境更趋复杂。

有色金属冶炼环节约占产业能源消耗总量的70%左右,因此生产过程节能降耗技术的开发与应用是有色金属工业节能减排工作的重点。结合有色金属生产过程重点节能技术的应用情况及未来的技术发展趋势,对冶炼工艺的资源效率、节能减排效果进行分析与评价,不仅能够为企业技术升级改造提供可行的建议和措施,还能为行业宏观节能减排目标的实现程度提供评判依据。本文阐述了物质流分析和面向流程的生命周期评价方法的主要观点、理论基础、研究思路和框架,以铝、镁、铜、铅、锌等为例,对上述方法在典型有色金属生产中的应用进行了总结和分析,并对其在有色金属工业节能减排中的进一步研究予以讨论和展望。

2 生命周期评价方法与物质流分析

2.1 面向流程的生命周期评价方法

生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)是对产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[1]。生命周期评价通过考察产品、行业甚至产业链的整个生命周期,对决策过程中的环境因素做出评价,这种评价可以是战略性的,也可以是具体运营和细节操作方面的,从而促使产业内部行为更符合可持续发展的原则。对于面向产品系统的完整生命周期评价所涉及的系统边界范围包括资源开采、原材料生产、产品加工制造、使用与维护、废弃处置与循环再利用等过程,即从“摇篮到坟墓”^[2]。如果研究的对象和目的是单位有色金属生产的环境负荷,则定义其系统边界时通常考虑其生产工艺过程及其主要的辅助生产过程,因此对于这类原材料生产过程的生命周期评价,也称之为从“摇篮到大门”的评价。

面向有色金属生产工艺流程的生命周期分析模型,首先需要详尽描述其生产过程,包括重要的辅助生产过程,即对系统边界的确定。第二,定义物质流。所谓物质流是指系统中区分各种物质的标识,用于描述系统中的物质与能量流向。对于物质流的描述包括物质流名称、化学结构与主要成分等,另外还要定义每个物质流所具有的形态及形态间的转换因子。第三,建立单元过程。功能单元是系统中某一过程的输入输出流集合,其主要作用是将产品系统中单元过程所涉及到的输入、输出流组织在一起,并通过配置参数,建立不同单元过程间的流入与流出比例关系。第四,流程建模。流程建模就是对产品系统的建模,用于将各个单元过程组织在一起,单元过程间以物质流(或中间产品)相互连接。各个单元过程的输入输出通常存在一定的比例关系,系统模型将根据指定的基准功能单位,将各单元的输入输

出量调整为以功能单位为基准的参数,以保证流程模型内的输入输出平衡,形成完整的生产流程图。第五,平衡计算。平衡计算对流程模型进行汇总计算,系统将不同单元过程的输入输出按其层次进行分类汇总,将相同的输入输出项目进行合并,最终用一个 $S \times N$ 矩阵表示计算结果,其中 N 表示单元过程数, S 表示物质流数,每个矩阵单元 K_{ij} 表示物质 i 在单元过程 j 中的输入/输出量。图2描述了生产系统的输入和输出及其内部单元过程。

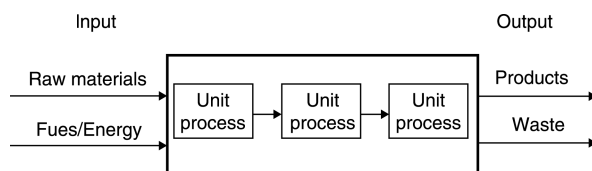


图2 生产系统及其内部单元过程示意图

Fig. 2 The sketch of production system and its unit processes

2.2 物质流分析方法

物质流分析(Material Flow Analysis,简称MFA)是研究特定工业部门或区域经济系统物质新陈代谢的一种方法,其通过对自然资源的开采、生产、转移、消耗、循环和废弃等过程的分析,揭示物质在特定区域中的流动特征和转化效率。其基本思想是,人类活动所产生的环境影响在很大程度上取决于进入经济系统的自然资源 and 物质的数量与质量,以及从经济系统排入环境的资源和废弃物的数量和质量^[3-4]。

物质流分析方法为产品设计、商业管理和制定公共政策等资源管理措施提供了系统分析的观点与方法。从总体上看,物质流分析主要分为两种类型:

(1)研究某种物质材料的环境问题,目的是减小这类物质材料在流动过程中的环境负荷。工业系统是全球生态系统的子系统,应以生态学的理论和方法来观察和分析工业系统的物质与能量流动。在考虑工业系统的物质流动时,应在全球生态的背景下,设计原料和废弃物的使用,以便将其对地球生态系统的影响最小化。

(2)对不同空间尺度进行物质流分析,研究解决物质使用效率、使用强度和减少废弃物产生的策略和方法。从部门、区域或国家的尺度,分析原料与能量的流动以及相关经济活动对全球或某个地区物质流动与循环的影响,研究物质生产及其生产结构是否符合可持续发展的要求,此类物质流分析的研究目的是,工业或社会新陈代谢的重构和减量化,以及资源生产力的提高。从某一产品的角度,分析原料、能量和废弃物在产品的生产、使用、废弃等整个生命周期内的分配和流动,其目的是开展生态设计、源头减量化或替换、再循环、再制

造、有毒有害废物的减少、延伸生产者的责任等。

物质流分析主要是一种静态的分析工具,其分析方法多是建立在输入-输出 (Input-Output) 分析的思想基础之上。物质流分析总的指导原则是质量守恒。一定数量的物质因人类活动而散失在自然界中,但其质量总是不变的。对于一个给定的系统,其物质平衡表现为以下形式:总输入=总输出+净累积,如公式 (1)。这说明系统中的物质总是与输入、在系统中累积以及作为输出而离开系统这三股物质流相联系。

$$\sum F_{\text{input}} = \sum F_{\text{output}} + \sum F_{\text{netstore}} \quad (1)$$

式中, F_{input} 表示系统物质的输入量; F_{output} 表示系统物质的流出量; F_{netstore} 表示物质在系统内的净累积量。

针对有色金属的特点,基于输入输出分析方法建立的用于模拟其全生命周期的物质流动过程如图 3 所示。这一输入输出流分析包括两项基本研究内容:首先是追踪并描述出入于环境的物质流,构建一个材料流和能量流分析的输入输出模型框架,包括研究对象,即物质或过程、以及系统边界;其次是描述与物质流动量相关的系统行为,即对系统中材料所流经过程的度量以及对材料循环的度量,主要度量指标包括:物质总需求、物质直接输入量、生产过程排出量、生态包袱 (Eco-Rucksack) 或隐流 (Hidden Flow) 以及进口和出口等。最后,根据系统行为的衡量结果,在总体考虑外在环境和材料流系统变量的基础上,提出改进系统环境表现的措施。

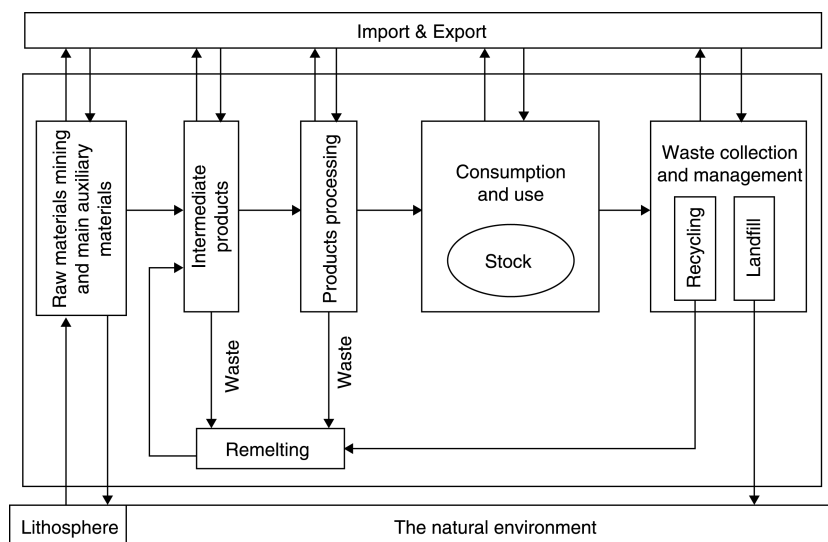


图 3 物质流分析框图

Fig. 3 The framework of Material Flow Analysis

材料的生命周期评价主要是对材料系统从原材料获取阶段开始到最终废弃的全过程中的环境影响 (资源、能源、排放物) 进行综合评估。它作为一种量化的决策分析工具,在材料及产品的环境负荷分析、生态设计、清洁生产审计、产业结构调整等领域发挥着重要的作用。从清单分析和影响评价阶段的研究内容来看,它们都与物质的输入和输出有着紧密的联系。生命周期评价和物质流分析都从研究系统或过程的各个子阶段入手,但是前者注重研究生态环境、人体健康、资源消耗等方面的环境问题,而后者主要分析物质材料流动的数量、结构和特征。因此在 LCA 分析中结合 MFA 分析,能够弥补生命周期评价中空间、时间等方面信息的局限性,提高基础数据资料的可靠性和全面性,进而提高影响评价的精确性^[5]。

3 环境负荷评价与物质流分析

3.1 镁

由于镁合金材料在交通工具的节能和环保领域具有重要的应用潜力,国际上针对镁生产和使用阶段的环境影响开展了相关研究工作。自 2002 年以来,由于世界镁生产和技术结构发生了很大的变化,澳大利亚等国的研究者们开展了原镁生产工艺过程及镁产品的环境负荷研究^[6-9],大部分原镁生产环境影响的研究报告和论文都将焦点集中于中国皮江法工艺的温室气体排放。Ramakrishnan 等^[8]对 2003 年镁生产工艺的研究结果显示,电解法的温室气体排放放在 20.4~26.4 kg CO₂eq/kg Mg,而中国皮江法的温室气体排放则在 37~47 kg CO₂eq/kg Mg,皮江法的排放量约是电解法的两倍。这也成为国际上对

中国皮江法炼镁环境影响的负面评价。在已开展的铝、镁等轻质结构材料替代钢质汽车零部件的生命周期比较分析中,仍有相当一部分研究以此结果作为评价依据^[10-13]。

自2005年,作者课题组基于中国资源、能源消费特征,结合我国皮江法炼镁的典型工艺过程,建立了面向镁生产流程的LCA分析模型。并对直接燃煤、发生炉煤气、焦炉煤气3种能源利用方案的皮江法炼镁工艺进行了“从摇篮到大门”的流程分析,计算得到了我国原镁生产3种能源利用方案工艺过程的环境负荷贡献率。结果表明:炼镁过程的环境负荷最大,在3种方案中所占比重均超过了60%。炼镁过程燃料的使用量决定了环境负荷的大小。尽管考虑了焦炉煤气和发生炉煤气

生产过程的环境负荷,采用焦炉煤气作为炼镁主要能源的总体环境负荷相对最小,与直接燃煤相比下降17.5%^[14]。该评价结果为构建煤焦化-硅铁-炼镁共生型产业链,实现产业链中各成员间的物质传递、副产品交换和能量的梯级利用,并为减少焦炭和原镁生产污染物排放提供了理论和实践依据。该产业共生模式在中国镁工业中推广后,作者单位与镁业协会合作进行了持续的跟踪研究,结果如图4所示,中国原镁生产的能耗和温室气体排放持续下降。考虑到中国原镁生产技术在清洁能源、余热利用等新技术和新装备的推广应用仍有很大提升空间,因此,中国镁原材料温室气体排放的连续降低仍是值得期待的。

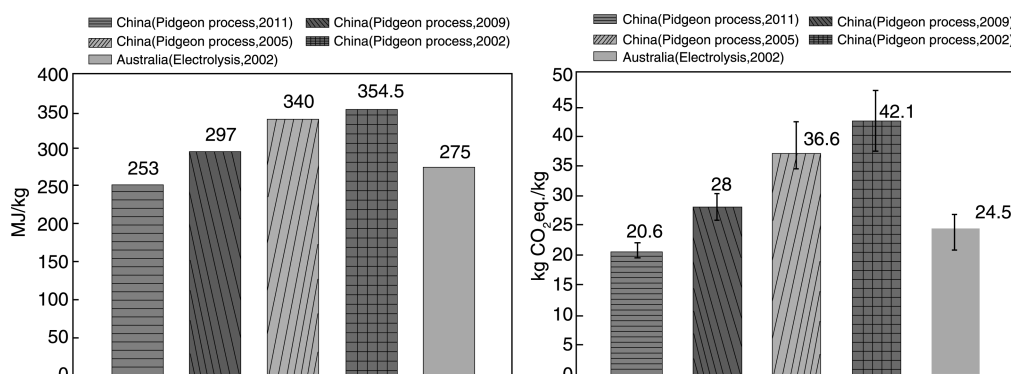


图4 生产1 kg原镁的能耗和温室气体排放指标比较

Fig. 4 Comparisons of energy consumption and greenhouse gas emission of 1 kg primary magnesium

国际镁业协会在2013年发布了《交通工具结构中镁部件的生命周期评价》报告,这对于弥补镁LCA研究数据的缺失起到了积极的作用^[15],该报告也引用和评述了作者课题组的相关工作。

3.2 铝

铝是国民经济建设和发展的关键基础材料,因此其生产过程的环境影响在20世纪90年代初就受到了普遍关注。自1992年,美国铝业协会、欧洲铝业协会和国际铝业协会先后编制了原生铝锭、铝板带、铝箔、铝挤压材和再生铝锭的生命周期清单,并进行了环境影响评价^[16-18]。在国际铝业协会的倡导和推动下,世界主要铝生产和消费大国建立了以生命周期评价为基本原则的铝与资源、能源和生态环境相协调的可持续发展战略框架和主要目标。

在生命周期评价方面,作者课题组通过构建铝生产流程模型,计算编制了我国原铝从铝土矿开采、氧化铝生产、炭阳极制备、铝电解和锭铸等阶段的生命周期清单,并对能耗和温室气体排放这两项指标进行了时间序列分析和比较;通过构建灰色关联度分析模型,分析了

资源消耗和生产工序能耗等影响因素与温室气体排放的关联性^[19];计算了我国再生铝和原铝生产的能耗和温室气体排放指标,并与欧洲再生铝生产进行了比较,找出了我国再生铝生产能耗和温室气体排放较高的原因^[20]。根据主要影响因素对温室气体排放的关联度等设定减排方案的系统边界、排放清单的概率密度函数以及主要影响因素的变化范围等相关参数,并结合我国铝工业中长期发展战略规划,对我国原铝生产的温室气体排放进行蒙特卡罗模拟,获得了温室气体减排的目标预测值。结果表明,中国单位原铝生产的温室气体排放量在低效率方案、中等效率方案和高效率方案中分别下降24%,30%和37%;其中,氧化铝和电解铝生产的温室气体减排值分别占到总温室气体减排的8%和13%,12%和16%,18%和17%,而且氧化铝生产在减少总排放时的潜力不断上升;并预测在2023年我国原铝的温室气体排放总量将达到峰值并呈现下降趋势。

在物质流分析方面,陈伟强等^[21-22]基于金属元素物质流分析的一般性框架,细化了铝在国家尺度上的社会流动过程,为进行中国国家尺度的铝物质流分析提供

了研究框架;并以 2005 年为时间截面,定量地描绘了中国国家尺度的铝物质流静态图景,提出了一系列改善进出口结构、减少铝损耗量、增加铝循环利用量的政策建议。楚春礼等^[23]应用投入产出方法描述了中国铝物质流各过程之间的相关关系,揭示了各过程的隐藏流,追踪了全国铝损失的主要来源,为铝行业循环经济的发展提供了政策建议。岳强等^[24-25]绘制了铝的物质循环流图,并分析了我国 2007 年的铝循环状况以及 2003~2007 年间各种含铝物质的净进口量、铝循环中各种含铝物质损失量和铝社会蓄积量净增量的变化,提出了我国今后铝工业进出口政策的重点和减少铝损失的工作重点。

3.3 铜

目前,我国是全球最大的铜消费国和重要的铜加工制造基地。长期以来,我国铜资源不能满足国内生产和消费的需求,尤其是近年来中国铜冶炼产能的急剧扩张而导致供需缺口较大,而且进口依赖性高,由此引起的资源瓶颈和环境约束问题日益突出。铜的生产、消费和循环回收与铜资源的保障能力密切相关。国内外许多学者通过物质流分析对铜的生产、供应预测和铜资源的循环回收进行了相关研究。温宗国等^[26]应用情景分析、存量模型和物质流方法分析研究了中国未来铜资源的代谢趋势,并用情景分析方法比较 3 种减量化措施的资源环境影响。岳强等^[27]在物质流分析中引入熵分析来研究我国铜资源效率,并提出通过减少尾矿和熔渣中铜的损失量,能够有效降低铜产品生命周期的熵增。在回收阶段,含铜物质聚集度的提高更有利于铜资源的回收。郭学益等^[28-29]运用“STAF”模型研究了我国铜的矿石指数、资源效率、贸易平衡指标、废铜指数等物质流分析指标,并与欧洲水平进行了对比,提出了控制原生铜产能,推进铜消费结构调整,加强再生铜的回收利用,以及尾矿和炉渣的回收利用,并加大相关工艺的研发,努力降低环境影响等措施。丁一等^[30]利用生态包袱系数对中国铜资源开发利用中的物质投入进行了估算,但生态包袱系数与不同国家物质资源的特点、生产方式和技术水平等相关,对于如何确定中国本土资源的生态包袱系数还有待于进一步研究。Daigo 等^[31]运用动态的物质流分析方法研究了日本铜资源的存量和废铜循环的潜力,并指出日本的高纯铜与铜合金在回收统计上的误差,强调了进一步细化分类回收对于提高含铜废料循环利用的重要意义。

国内外学者针对铜的开采、冶炼等生产过程的环境影响也开展了大量的研究。姜金龙等^[32]运用 LCA 方法,对比了火法和湿法生产金属铜的环境负荷。评价结果表

明,湿法炼铜工艺简单、能耗低,污染物排放少,环境协调性好于火法炼铜。然而,我国湿法工艺发展较为缓慢,90%以上的铜产量均来源于火法。另外,SO₂回收率低是造成酸雨和人体毒害效应较大的主要原因。因此,提高 SO₂的回收率对减小火法炼铜的环境负荷至关重要。阮仁满等^[33]对生物提铜、浮选—闪速炼铜生产过程进行了生命周期分析,结果表明,生物提铜生产流程短、物耗少、节能减排,与火法炼铜相比,对环境的影响显著减少。从保护环境和可持续发展出发,应加强生物冶金技术研究开发。李英顺等^[34]对铜炉渣和铜矿石回收铜的选矿过程的环境协调性进行了对比研究,并获得了选矿各工序过程的环境负荷评价结果。该研究认为,尽管铜炉渣选矿生产过程每生产 1 kg 精矿的环境负荷约为铜矿石的 1.32 倍,但随着国内铜精矿供应缺口的增大,从铜炉渣中回收铜资源将显著地提高资源利用率,有利于循环经济发展。Memarya 等^[35]运用时间序列的生命周期评价方法研究了澳大利亚铜采矿和冶炼生产过程的环境影响。结果表明,矿石品位的变化、生产技术及区域能源结构都会对铜生产的碳足迹和其它环境负荷产生重要影响,其中矿石品位的变化对环境负荷的影响较为显著。随着铜资源的短缺和铜冶炼能力的提高,大量铜炉渣中的铜经过选矿过程得到了回收,但是不可避免地带来了环境负荷。

3.4 铅锌

2013 年我国铅锌产量合计 978 万吨,占世界铅锌总产量的 41%,产量连续多年位居世界第一。铅锌广泛用于电气工业、机械工业、军事工业、冶金工业、化学工业、轻工业和医药业等领域。世界上 80%以上的铅被用于生产铅酸电池。此外,铅金属在核工业、石油工业等部门也有较多的用途。锌金属具有良好的压延性、耐磨性和抗腐蚀性,能与多种金属制成物理与化学性能更加优良的合金。我国铅锌工业的快速发展,也给生态环境造成了一定的影响和破坏。张伟建等^[36]采用 LCA 方法针对韶冶帝国熔炼法(ISP 法)的生产过程进行了环境负荷评价,确定了能源总需求、温室效应和酸化效应在各工艺阶段中所占的比重,找出了生产流程主要环境压力所在,并在此基础上指出了韶冶 ISP 工艺改进的措施。何静等^[37]以株洲冶炼厂为例,对锌冶炼过程的环境影响进行系统研究,确定了渣处理过程是该厂环境负荷的主要承担者,并针对该环节提出了进一步削减污染物排放的措施。Daniel 等^[38]采用 LCA 方法对废弃电池中铅的两种处置方式进行了对比研究,结果表明废电池中铅的回收在危险废弃物排放、持续性毒性、富营养化、酸化效应和光化学烟雾形成潜力等方面的环境表现

更好,但在人体毒性、温室效应等方面的影响大于废电池中铅的常规处置。

国内外学者对铅锌的物质流进行了研究,其目的在于进一步阐明铅锌物质的流向及其资源循环利用的状况,为实现铅锌资源的高效综合利用提供指导。万文玉等^[39]对再生铅熔炼各个工序的铅物质流核算表明,铅污染主要来源于短窑熔炼工序炉渣和铅尘的排放,以及合金工序中的浮渣。因此,应加强熔炼工序中烟尘的处理,降低炉渣和浮渣的产生量。郭学益等^[40]分析了2006年我国铅的社会存量变化及其流动状况,计算了铅矿石资源效率、废铅指数等指标,总结了我国在铅资源循环利用方面的不足,并对铅工业的发展和资源的循环利用提出了建议。马兰等^[41-42]运用“STAF”模型对比分析了2000~2010年我国铅物质流的变化,计算了铅矿石消耗量、环境释放量、资源和环境效率、循环率等指标,分别从消费、贸易、技术、管理等方面分析了我国铅物质流改变的原因,为铅工业资源环境改善提供了依据。Spatari等^[43]采用“STAF”模型研究了欧洲锌的物质流动情况,结果表明,欧洲废弃的锌资源主要来源于建筑拆迁废料和报废车辆;然而,只有约34%的废锌得到了循环利用,锌大量损失到环境中,对其带来的环境影响应考虑从时空尺度进行评估。Mao等^[44-45]讨论了基于时间和空间因素的铅全生命周期物质流的数据采集和评估方法,指出尽管在数据方面存在相当大的限制,但对于在各种空间尺度合理定量描述铅生命周期的信息是足够可用和准确的。并在此基础上研究了世界范围内铅的流量和流向,为铅资源的互补性研究、能源利用、铅废弃的管理和环境问题提供了框架。

4 结 语

有色金属生产、消费和循环利用是一个复杂的非线性系统,与其相关的资源消耗、物质流动及其产生的环境影响很难预测。物质流分析方法利用输入-输出或投入-产出平衡分析的方法,对整个系统物质流动的状况进行分析,得到了简洁的物质流动效率和可持续发展程度的示踪指标,拓展了可持续发展研究方法在有色金属领域的应用。然而,目前的物质流分析方法在研究有色金属时也有其不足之处,这主要表现在:①现行的物质流分析只考虑物质的质量,却没有涉及不同物质流可能带来的不同的环境影响,弱化了物质流指标与物质流动所引起的环境影响之间的联系。一些质量小的物质流,比如少量的有毒重金属元素(铅、汞、镉等)可能会带来很大的负面环境影响。②国家尺度的物质流分析案例较多,原因在于宏观层面物质流分析所需的数据比较

容易获得,但是类似于小品种的有色金属,如稀土、钨、钼等的相关数据却经常由于一些客观原因(如统计内容的局限、大公司和企业的数据库保密等)难以获得,而这也限制了物质流分析方法在有色金属中的使用范围。

由于有色金属品种众多而且生产工艺流程各具特点,资源、能源消耗、污染物排放与工艺流程密切相关,生产系统某一过程的工艺改进或优化与哪些过程的关系最为密切,即是否会导致其他过程环境负荷的增加或降低;有色金属生产过程中体现中国资源特点和工艺技术水平特征参数,如能源消费结构、先进技术的实施、二次资源的循环率等因素与环境负荷及节能减排的关系等问题都具有重要的研究意义。但是,从总体上看,有色金属生产的生命周期评价研究大部分仍局限于能耗和温室气体排放等少数指标,并没有结合有色金属生产流程的特点对上述问题进行深入的研究,因此为制定决策提供依据的综合评价结果尚与业内所期待的标准存在较大差距。中国有色金属产业节能减排的任务艰巨,潜力巨大,在有色金属行业充分发挥生命周期评价和物质流分析技术的优势,将为实现中国有色金属工业节能减排中长期目标提供有利的决策支持和技术保障。

参考文献 References

- [1] ISO 14040 International Standard. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework* [S]. 2006.
- [2] Guinée J B, Heijungs R, Huppes G, et al. *Environ Sci Technol* [J], 2011, 45 (1): 90-96.
- [3] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, et al. *Resource Flows: the Material Basis of Industrial Economies* [M]. Washington, DC: World Resources Institute, 1997: 1-65.
- [4] Bringezu S, Schütz H, Moll S. *Journal of Industrial Ecology* [J], 2003, 7 (2): 43-64.
- [5] Bouman M, Heijungs R, Voet E, et al. *Ecological Economics* [J], 2000, 32 (2): 195-216.
- [6] Ramakrishnan S, Koltun P. *Magnesium Technology* [J], 2004: 173-178.
- [7] Ramakrishnan S, Koltun P. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2004, 24: 49-64.
- [8] Cherubini F, Raugei M, Ulgiati S. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2008, 52: 1 093-1 100.
- [9] Koltun P, Tharumarajah A, Ramakrishnan S. *Magnesium Technology* [J], 2005: 43-49.
- [10] Tharumarajah A, Koltun P. *Journal of Cleaner Production* [J], 2007, 15: 1 007-1 013.
- [11] Hakamada M, Furuta T, Chino Y, et al. *Energy* [J], 2007, 32: 1 352-1 360.
- [12] Bartos S, Laush C, Scharfenberg J, et al. *Journal of Cleaner*

- Production* [J], 2007, 15: 979-987.
- [13] Ehrenberger S, Schmid S, Song S B, et al. 65th Annual World Magnesium Conference [J], 2008.
- [14] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, et al. *Int J Life Cycle Assess* [J], 2009, 14 (5): 480-489.
- [15] Ehrenberger S, Dieringa H, Friedrich H E. *Life Cycle Assessment of Magnesium Components in Vehicle Construction*. [EB/OL]. (2013-05-16) [2015-08-20]. http://www.intlmag.org/newsroom/2013IMA_LCA_Report_Public.pdf.
- [16] Roy F. *Life Cycle Inventory Report for the North American Aluminum Industry* [M]. Washington, D. C.: Aluminum Association, 1998: 1-10.
- [17] European Aluminium Association. *Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry*. [EB/OL]. (2008-11-07) [2015-08-20]. http://www.eaa.net/upl/4/en/doc/EAA_Environmental_profile_report_May08.pdf.
- [18] International Aluminium Institute. *Life Cycle Assessment of Aluminium: Inventory Data for the Worldwide Primary Aluminium Industry*. [EB/OL]. (2008-11-05) [2015-08-20]. <http://www.world-aluminium.org/cache/f0000166.pdf>.
- [19] Guo Jie (郭杰), Gao Feng (高峰), Wang Zhihong (王志宏), et al. *Journal of Environmental Engineering* (环境工程学报) [J], 2014, 8 (11): 4 858-4 863.
- [20] Ding Ning (丁宁), Gao Feng (高峰), Wang Zhihong (王志宏), et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报) [J], 2012, 22 (10): 2 908-2 915.
- [21] Chen Weiqiang (陈伟强), Shi Lei (石磊), Qian Yi (钱易). *Resource Science* (资源科学) [J], 2008, 30 (7): 1 004-1 012.
- [22] Chen Weiqiang (陈伟强), Shi Lei (石磊), Qian Yi (钱易). *Resource Science* (资源科学) [J], 2008, 30 (9): 1 320-1 326.
- [23] Chu Chunli (楚春礼), Ma Ning (马宁), Shao Chaofeng (邵超峰), et al. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究) [J], 2011, 24 (9): 1059-1 066.
- [24] Yue Qiang (岳强), Wang Heming (王鹤鸣), Lu Zhongwu (陆钟武). *Resource Science* (资源科学) [J], 2010, 32 (3): 472-477.
- [25] Yue Qiang, Wang Heming, Lu Zhongwu, et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2014, 24: 1 134-1 144.
- [26] Wen Zongguo (温宗国), Ji Xiaoli (季晓立). *Journal of Tsinghua University* (清华大学学报) [J], 2013, 53 (9): 1 283-1 288.
- [27] Yue Q, Lu Z W, Zhi S K. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2009, 53: 680-687.
- [28] Guo Xueyi (郭学益), Song Yu (宋瑜), Wang Yong (王勇). *Journal of Natural Resources* (自然资源学报) [J], 2008, 23 (4): 671-672.
- [29] Guo X Y, Song Y. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2008, 52: 874-882.
- [30] Ding Yi (丁一), Wang Qing (王青), Gu Xiaowei (顾晓薇). *Resource Science* (资源科学) [J], 2005, 27 (5): 27-32.
- [31] Ichiro D, Susumu H, Matsuno Y, et al. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2009, 53: 208-217.
- [32] Jiang Jinlong (姜金龙), Dai Jianfeng (戴剑峰), Feng Wangjun (冯旺军), et al. *Journal of Lanzhou University of Technology* (兰州理工大学学报) [J], 2006, 32 (1): 19-21.
- [33] Ruan Renman (阮仁满), Zhong Shuipin (衷水平), Wang Dianzuo (王淀佐). *Multipurpose Utilization of Mineral Resources* (矿产综合利用) [J], 2010, 3: 33-37.
- [34] Li Yingshun (李英顺), Lu Maixi (路迈西), Hu Hualong (胡华龙), et al. *Journal of Environmental Engineering* (环境工程学报) [J], 2009, 3 (2): 349-353.
- [35] Memarya R, Giurco D, Mudd G, et al. *Journal of Cleaner Production* [J], 2012, 33: 97-108.
- [36] Zhang Weijian (张伟健), Xiao Songwen (肖松文), Guo Xueyi (郭学益). *Mining and Metallurgical Engineering* (矿冶工程) [J], 2003, 23 (5): 53-59.
- [37] He Jing (何静), Ma Rongjun (马荣骏), Zeng Guangming (曾光明), et al. *Nonferrous Metals Engineering* (有色金属工程) [J], 2006, 58 (2): 99-102.
- [38] Stavros E D, Costas P P. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2008, 52: 883-895.
- [39] Wan Wenyu (万文玉). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报) [J], 2014, 8: 66-69.
- [40] Guo Xueyi (郭学益), Zhong Juya (钟菊芽), Song Yu (宋瑜). *Journal of Beijing University of Technology* (北京工业大学学报) [J], 2009, 35 (11): 1 554-1 561.
- [41] Ma Lan (马兰), Mao Jiansu (毛建素). *Journal of Environmental Sciences* (环境科学) [J], 2014, 35 (7): 2 829-2 833.
- [42] Ma Lan (马兰), Mao Jiansu (毛建素). *Journal of Environmental Sciences* (环境科学) [J], 2014, 35 (8): 3 219-3 224.
- [43] Spataro S, Bertram M, Fuse K, et al. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2003, 39: 137-160.
- [44] Mao J S, Dong J M, Graedel T E. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2008, 52: 1 058-1 064.
- [45] Mao J S, Dong J M, Graedel T E. *Resources, Conservation and Recycling* [J], 2008, 52: 1 050-1 057.

(编辑 惠琼)